

Aus dem Institut für Rechtsmedizin der  
Ludwig-Maximilians-Universität München

Vorstand: Prof. Dr. med. Matthias Graw

**Augenverletzungen durch Sehhilfen  
beim  
Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung**

**Entwicklung einer experimentellen Komponentenmethode**

Dissertation  
zum Erwerb des Doktorgrades der Humanbiologie  
an der medizinischen Fakultät der  
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von  
Stefan Horion  
aus Mayen  
2013

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät  
der Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Wolfgang Eisenmenger

Mitberichterstatter: Priv. Doz. Dr. Daniel Kook  
Prim. Prof. Dr. Siegfried Priglinger

Mitbetreuung durch den  
promovierten Mitarbeiter: Dr. med. W. Hell

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. M. Reiser, FACR,  
FRCR

Tag der mündlichen Prüfung: 14.03.2013

---

# Danksagung

An erster Stelle geht mein Dank an Prof. Wolfgang Eisenmenger und Prof. Matthias Graw für die Möglichkeit, diese Dissertation am Institut für Rechtsmedizin durchführen zu können.

Besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Betreuer Dr. Wolfram Hell für die geduldige Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit.

Meinen Kollegen, vor allem Dr. Sylvia Schick und Dipl. Biol. Stefanie Lochner, danke ich für die geduldige Hilfe bei der Durchführung der Versuche und dem Korrekturlesen dieser Arbeit sowie Dr. Holger Muggenthaler vom rechtsmedizinischen Institut in Jena.

Dem ADAC Testzentrum in Landsberg am Lech danke ich für die Möglichkeit des Aufbaus der Anlage, besonders Alois Sacher, der mir bei der technischen Umsetzung und Durchführung jederzeit zur Verfügung stand.

Des Weiteren danke ich Volker Sandner und seinen Mitarbeitern für die wertvollen Überlegungen und für die Bereitstellung der Versuchsdaten.

Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Hans-Jürgen Grein von der Fielmann Akademie für die Hilfe im Bereich der Brillen, Brillenfassungen und Brillengläser.

Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern für die langjährige liebevolle Unterstützung.





## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>13</b>
1.1	Stand der Forschung.....	16
1.2	Ziel der Arbeit.....	19
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>22</b>
2.1	Das Auge.....	22
2.2	Augenverletzungen.....	26
2.3	Brillen und Materialien .....	28
	2.3.1 Brillenfassungen .....	30
	2.3.2 Brillengläser.....	30
	2.3.3 Brechungsindex (Brechzahl).....	32
2.4	Experimentelle Simulation (Laborversuch).....	32
	2.4.1 Frontalaufprallversuche .....	32
	2.4.1.1 EuroNCAP (European New Car Assessment Programme) .....	34
	2.4.1.2 RCAR (Research Council for Automobile Repairs) .....	34
	2.4.1.3 Physikalische Grundlagen Pkw-Frontalauprall.....	34
	2.4.2 Komponentenversuche.....	36
	2.4.3 Anthropomorphic Test Device (ATD) .....	36
2.5	Airbag.....	38
	2.5.1 Wirkungsweise des Airbags.....	38
	2.5.2 Aufprallkinematik und Entfaltung des Airbags .....	39
<b>3</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>41</b>
3.1	Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung.....	43
3.2	Ermittlung bruchgefährdeter Brillenfassungen und Linsenmaterialien.....	45
	3.2.1 Versuchsaufbau .....	45
	3.2.2 Erste Versuchsserie, Differenzierung von Brillentypen .....	49
	3.2.3 Zweite Versuchsserie, Differenzierung der Befestigung von Brillengläsern/Brillenfassungen.....	53
	3.2.3.1 Fassungsmodell 1 .....	53
	3.2.3.2 Fassungsmodell 2 .....	54

3.2.3.3	Fassungsmodell 3 .....	54
3.2.3.4	Fassungsmodell 4 .....	55
3.2.4	Dritte Versuchsserie, Differenzierung von Brillengläsern.....	56
3.3	Ermittlung der Parameter für Pkw-Frontalaufprall und Generierung eines Beschleunigungskorridors .....	59
3.3.1	Korridorversuche (EuroNCAP, RCAR).....	61
3.4	Entwicklung und Validierung einer experimentellen Komponentenmethode zur Überprüfung von Brillen und ihrer Materialien beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung .....	63
3.4.1	Übertragbarkeit auf ein physikalisches Modell .....	64
3.4.2	Eintauchwinkel Kopf.....	66
3.4.3	Versuchsaufbau .....	67
3.4.3.1	Pendel .....	70
3.4.3.2	Airbaghalterung und Airbagauslösemechanismus .....	72
3.4.3.3	Pendelauslösemechanismus.....	74
3.4.3.5	Mess- und Dateneinheit .....	75
3.4.3.4	Testmatrix.....	75
3.5	Untersuchung der Bruchfestigkeit von Brillen und Brillenmaterialien mittels experimenteller Komponentenmethode.....	77
3.5.1	Versuchsmatrix .....	77
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>79</b>
4.1	Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall .....	79
4.2	Ermittlung der bruchgefährdeten Brillenfassung und der Linsenmaterialien. ....	81
4.2.1	Ergebnis erste Versuchsserie, Differenzierung von Brillentypen.....	81
4.2.2	Ergebnis zweite Versuchsserie, Differenzierung von Gläsern/Fassungen ..	84
4.2.3	Ergebnis dritte Versuchsserie, Differenzierung von Brillengläsern .....	90
4.2.4	Zusammenfassendes Ergebnis der bruchgefährdeten Brillenfassungen und Linsenmaterialien.....	93
4.3	Ergebnisse der Ermittlung der Parameter für Pkw-Frontalaufprall (EuroNCAP, RCAR) .....	95
4.3.1	Unterer Geschwindigkeitsbereich, RCAR-Versuch.....	95
4.3.2	Oberer Geschwindigkeitsbereich, EuroNCAP-Versuch .....	97

4.3.3	Generierung Beschleunigungskorridor.....	98
4.4	Ergebnisse der Validierung der experimentellen Komponentenmethode zur Überprüfung von Brillen und ihren Materialien beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung.....	100
4.5	Ergebnisse der Untersuchung der Bruchfestigkeit von Brillen- und Brillenmaterialien mittels experimenteller Komponentenmethode .....	105
4.5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuche mit der experimentellen Komponentenmethode .....	106
<b>5</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>108</b>
5.1	Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall .....	109
5.2	Bruchgefährdete Materialien .....	111
5.2.1	Erste Versuchsserie (Differenzierung der Brillentypen) .....	111
5.2.2	Zweite Versuchsserie (Differenzierung der Befestigung Gläser/Fassung) .....	112
5.2.3	Dritte Versuchsserie (Differenzierung von Brillengläsern) .....	114
5.3	Entwicklung und Validierung einer experimentellen Komponentenmethode .....	115
<b>6</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>120</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>122</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>125</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>130</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteil der Brillenträger unter den Pkw-Fahrern in den Jahren von 1999 bis 2008 .....	13
Abbildung 2: Verkehrsunfallopfer 1955 bis 2009 [2] .....	14
Abbildung 3: Ausstattung von Neufahrzeugen mit Airbags (nach [21]).....	15
Abbildung 4: Bodyblock ECE-R12, skizzierter Versuchsaufbau .....	19
Abbildung 5: Bodyblock-ECE-R12 , Dynamic Test Center DTC, Vauffelin (CH).....	19
Abbildung 6: Aufbau Auge [13] .....	23
Abbildung 7: Aufbau Hornhaut mikroskopisch [13] .....	24
Abbildung 8: Verletzung des Auges (Abrasio der Cornea und Hyphaema) durch Airbag-Brilleninteraktion [10] .....	27
Abbildung 9: Brillenmodell (Vollrand); struktureller Aufbau [36].....	28
Abbildung 10: Brillenmodell (Tragrand); struktureller Aufbau [36] .....	29
Abbildung 11: Brillenmodell (randlos); struktureller Aufbau [36] .....	29
Abbildung 12: Beispiele von Glasbefestigungen bei randlosen Brillen .....	30
Abbildung 13: Sprödigkeit/Bohrbarkeit einen Brillenglases im Vergleich zu seinen Brechungsindizes [34] .....	31
Abbildung 14: Versuchsanordnung beim Pkw-Frontalaufprall [21] .....	33
Abbildung 15: Komponentenversuch dynamischer Sitztest, Heckaufprall für die Sitzbewertung zur Prävention von Halswirbelsäulenverletzungen ...	36
Abbildung 16: Hybrid III 50 Perzentile Dummy .....	37
Abbildung 17: Zeitlicher Ablauf der Airbagauslösung für Fahrer und Beifahrer [26] .	39
Abbildung 18: Kraftentwicklung beim Airbag [27] .....	40
Abbildung 19: Vorgehensweise, Darstellung Flussdiagramm.....	41
Abbildung 20: Positionierung Brille am HIII-Dummykopf .....	44
Abbildung 21: Crashtest Wildhaus.....	44
Abbildung 22: Skizze Versuchsaufbau Pendelanlage zur Ermittlung der Bruchfestigkeit von Brillen- und Linsenmaterialien .....	46
Abbildung 23: Aufhängung HIII-Dummy .....	46
Abbildung 24: Eintauchwinkel Kopf/Airbag .....	47
Abbildung 25: Eintauchwinkel Kopf in Schaumstoffmatte .....	47
Abbildung 26: Frankfurter Ebene [40].....	48
Abbildung 27: Hybrid-III-Dummykopf mit Ohren .....	48
Abbildung 28: Vergleich Kopfverzögerung Schaumstoff vs. Airbag.....	49

Abbildung 29: Brille, Versuche 1 bis 5 .....	50
Abbildung 30: Vollrandbrille, Versuche 6 bis 10 .....	50
Abbildung 31: Versuch 11, je vier Verschraubungen pro Glas .....	51
Abbildung 32: Versuche 12 bis 15, je zwei Verschraubungen pro Glas .....	51
Abbildung 33: Fassungsmodell 1.....	54
Abbildung 34: Zwei Bohrlöcher, eine Verschraubung, ein Stift.....	54
Abbildung 35: Fassungsmodell 2, zweite Testserie .....	54
Abbildung 36: Horizontale Zweilochbohrung .....	54
Abbildung 37: Fassungsmodell 3, zweite Testserie.....	55
Abbildung 38: Senkrechte Vierlochbohrung.....	55
Abbildung 39: Fassungsmodell 4, zweite Testserie.....	55
Abbildung 40: Zweilochbohrung .....	55
Abbildung 41: Beispiel eines Beschleunigungskorridors [30] .....	59
Abbildung 42: ECE-Frontalaufprallregeln .....	60
Abbildung 43: Versuchskonfiguration Frontalaufprallversuche.....	61
Abbildung 44: HIII-Dummykopf mit angepassten Ohren und Brille.....	62
Abbildung 45: Fahrer, Beifahrer mit Brille .....	62
Abbildung 46: Definition Achsen Euro NCAP, RCAR .....	64
Abbildung 47: Physikalisches Pendel mit starrer Aufhängung.....	66
Abbildung 48: Eintauchvorgang Pkw-Frontalaufprall .....	67
Abbildung 49: Versuchsraum, Aufbau mit Pendelaufhängung auf Stahlträger .....	68
Abbildung 50: Skizze Aufbau experimentelle Komponentenmethode .....	70
Abbildung 51: Versuchspendel mit HIII-Dummykopf .....	71
Abbildung 52: Airbaghalterung und Auslösemechanismus.....	73
Abbildung 53: Elektronik/Pendelanlage .....	74
Abbildung 54: Pendelauslösemechanismus .....	75
Abbildung 55: Kinematischer Bewegungsablauf Dummy, Pkw-Frontalaufprall Fahrerseite .....	80
Abbildung 56: Tragrandfassungen mit leichten Deformationen .....	82
Abbildung 57: Randlose Fassung Versuch 13, Ausbruch am Mittelsteg .....	82
Abbildung 58: Randlose Fassung Versuch 11 und 12.....	82
Abbildung 59: Vollrandfassung .....	84
Abbildung 60: Randlose Fassung .....	84
Abbildung 61: Verformung einer Vollrandfassung nach dem Aufprall.....	84

Abbildung 62: Bruchmuster und Splitterung zweite Versuchsserie.....	87
Abbildung 63: Verteilung gebrochene Gläser nach Bohrlochdicken .....	88
Abbildung 64: Bruchneigung randloser Brillenfassungen, zweite Versuchsserie.....	89
Abbildung 65: Häufigkeit der Bruchstellen.....	89
Abbildung 66: Verteilung der gebrochenen Gläser nach ihrer dioptrischen Wirkung	90
Abbildung 67: Verteilung der gebrochenen Gläser nach ihren Bohrlochdicken .....	92
Abbildung 68: Bruchtendenz bezogen auf die Glassorte .....	93
Abbildung 69: Bruchgefährdetste Brille .....	94
Abbildung 70: RCAR-Versuch Kopfbeschleunigungen (Untergrenze).....	95
Abbildung 71: Postcrash Dummy .....	96
Abbildung 72: Auftreffpunkt Brille .....	96
Abbildung 73: EuroNCAP-Pkw-Frontalaufprallversuch, Kopfbeschleunigung (Obergrenze) .....	97
Abbildung 74: Precrash EuroNCAP .....	98
Abbildung 75: Postcrash Brille.....	98
Abbildung 76: Kopfbeschleunigungen Korridorversuche .....	99
Abbildung 77: Beschleunigungskorridor Kopf, Pkw-Frontalaufprall .....	100
Abbildung 78: Zeitlicher Ablauf Entfaltungs- und Eindringvorgang Fahrerairbag ...	102
Abbildung 79: Validierungskurve Kopfbeschleunigung Pendel.....	103
Abbildung 80: Validierung experimentelle Komponentenmethode .....	104
Abbildung 81: Versuch 3.....	106
Abbildung 82: Versuch 6.....	106
Abbildung 83: Pre- und Postcrash bei zerstörtem und intakt gebliebenem Brillenmodell .....	107

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsmethoden zu Frontalkollisionen [21] .....	33
Tabelle 2: Messpuppen-Überblick: Dummies und ihre Einsatzgebiete [21] .....	37
Tabelle 3: Versuchsmatrix erste Versuchsserie.....	52
Tabelle 4: Matrix des Verglasungsschemas für die zweite Versuchsserie .....	56
Tabelle 5: Versuchsmatrix dritte Versuchsserie.....	57
Tabelle 6: Versuchsmatrix Korridorgenerierung .....	62
Tabelle 7: Versuchsmatrix, Validierung experimentelle Versuchsmethode .....	76
Tabelle 8: Versuchsmatrix Brillen, experimentelle Versuchsmethode .....	78
Tabelle 9: Versuchsmatrix zu der Kinematik der Brille .....	79
Tabelle 10: Ergebnisse der ersten Versuchsserie .....	83
Tabelle 11: Bruchneigung randloser Fassungen nach Bruchneigung und Anzahl der Bruchstücke pro Fassung .....	85
Tabelle 12: Zweite Versuchsserie, Darstellung nach Bohrlochdicken und nach Wirkung des Brillenglases.....	86
Tabelle 13: Darstellung des Bruchmusters – Anzahl und Lokalisation der Bruchstellen .....	91
Tabelle 14: Ergebnisse Korridorversuche.....	98
Tabelle 15 Ergebnisse Validierungsversuche.....	102
Tabelle 16: Ergebnisse experimentelle Komponentenmethode.....	105





# 1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland ist der Anteil der brillentragenden Bevölkerung in den letzten 50 Jahren ständig gestiegen. Heute tragen insgesamt 64 Prozent der Bevölkerung ab 16 Jahren eine Brille, das entspricht ca. 40,4 Millionen Brillenträgern, mit steigender Tendenz [1].

Im Straßenverkehr tragen ca. 62 Prozent der Pkw-Fahrer eine Brille, davon 34 Prozent ständig und 28 Prozent gelegentlich [1]. Abbildung 1 zeigt den prozentualen Anteil der brillentragenden Bevölkerung im deutschen Straßenverkehr im Zeitraum von 1999 bis 2008.

Der Anteil der Brillenträger unter den Pkw-Fahrern									
	Pkw-Fahrer in -								
	Bundesrepublik insgesamt			den alten Bundesländern			den neuen Bundesländern		
	1999 %	2005 %	2008 %	1999 %	2005 %	2008 %	1999 %	2005 %	2008 %
Es tragen eine Brille	57	62	62	59	63	62	53	61	60
darunter:									
ständig	30	34	34	32	35	35	25	29	27
gelegentlich	27	28	28	27	28	27	28	32	33
Es tragen Kontaktlinsen, Haftschalen	4	4	4	4	4	5	2	3	3
Nein, weder noch	41	35	36	39	35	35	47	37	39
	102	101	102	102	102	102	102	101	102
n =	(13.222)	(14.374)	(14.305)	(10.648)	(11.721)	(11.766)	(2.574)	(2.653)	(2.539)
Quelle: Allensbacher Markt- und Werbeträgeranalysen AWA '99, AWA 2005, AWA 2008									
© IFC-Allensbach									

Abbildung 1: Anteil der Brillenträger unter den Pkw-Fahrern in den Jahren von 1999 bis 2008 [1]

Auf Deutschlands Straßen ereignen sich jährlich ca. 2,25 Millionen polizeilich erfasste Verkehrsunfälle mit Personenschäden. 67 % der Beteiligten an Unfällen mit Personenschäden sind Pkw-Fahrer [2].

Das Gesamtverkehrsaufkommen ist in den letzten Jahren weiter stark angestiegen.

Infolge der konsequenten Verbesserung der Fahrzeugsicherheit durch die Automobilindustrie wurde ein stetig steigendes Selbstschutzniveau der Insassen erreicht. Dies wird in den sinkenden Zahlen für tödlich verletzte Personen im Straßenverkehr trotz steigenden Verkehrsaufkommens deutlich.

Vom Jahre 1953 an nahm die Zahl der Verkehrstoten bei Straßenunfällen in Deutschland von 12 631 bis auf den Höchststand von 21 332 Personen im Jahre 1970 zu. Danach sank sie fast kontinuierlich und erreichte 2009 den bisher niedrigsten Stand mit 4152 Personen [2]. Aktuell berichtet der ADAC, dass die Anzahl der Unfalltoten nach Verkehrsunfällen im Jahr 2010 erstmalig unter 4000 Menschen gesunken ist [37].

Entwicklung von 1953 bis 2009

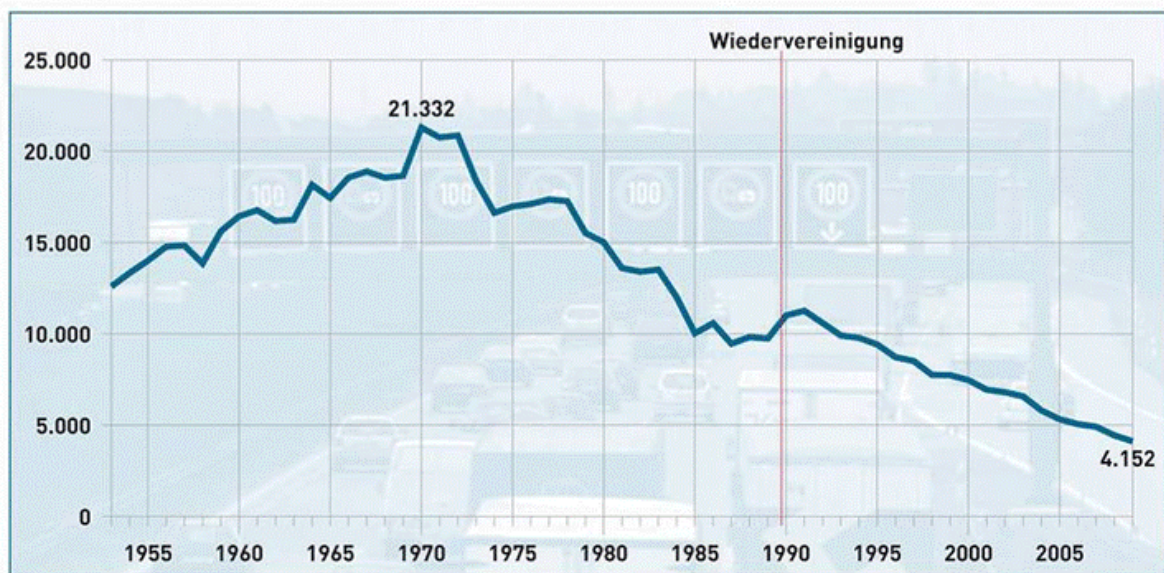


Abbildung 2: Verkehrsunfallopfer 1955 bis 2009 [2]

Ein Anteil an der Reduktion der tödlich Verletzten und Schwerverletzten wird durch die Ausrüstung der Fahrzeuge mit Airbags, zusätzlich zum Sicherheitsgurt, erreicht. Der Airbag zählt seit Anfang der 80er Jahre zu einer der wichtigsten und effektivsten Neuentwicklungen in der passiven Sicherheit. Der Fahrer- und der Beifahrerfrontairbag sind die am häufigsten installierten Module bei der Ausstattung von Neufahrzeugen (Abbildung 3). Durch sie konnte die Anzahl der Verletzten und Getöteten um ein weiteres Drittel verringert werden [2].

In vielen Fahrzeugen gehören heute neben den Frontairbags auch Seiten- und Seitenkopfairbag zur serienmäßigen Ausstattung.

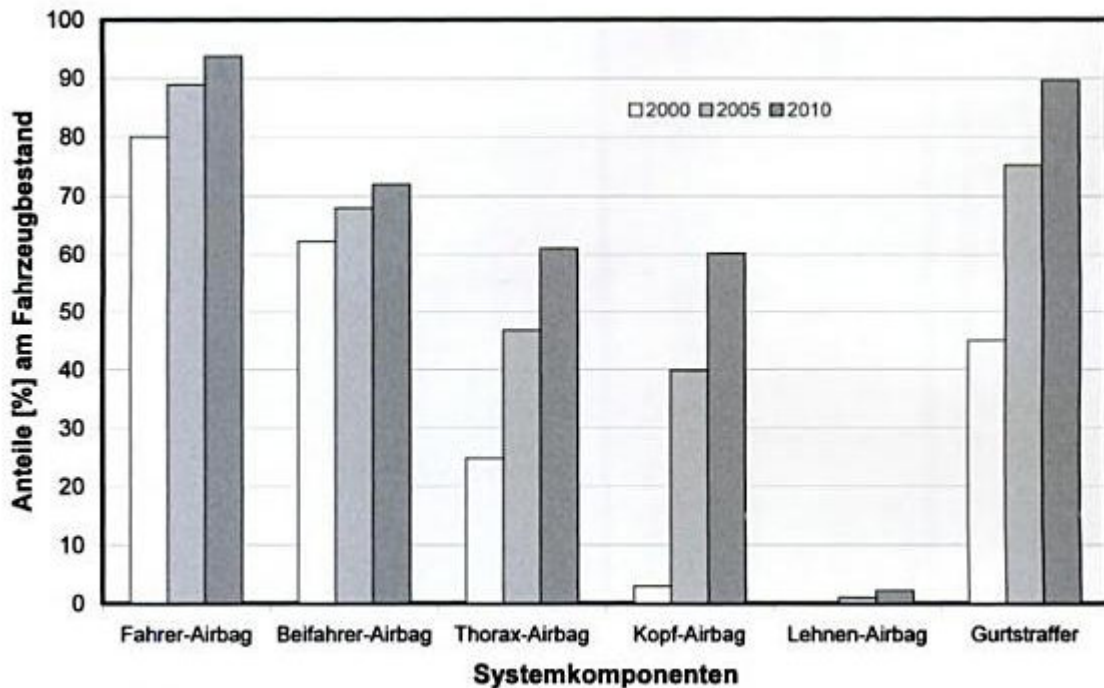


Abbildung 3: Ausstattung von Neufahrzeugen mit Airbags (nach [21])

Der deutliche verletzungspräventive Nutzen der Airbagauslösung ist unbestritten, wobei bislang Gesichts- und Augenverletzungen als leichte Nebenwirkungen dieses Systems der Insassensicherung betrachtet wurden. Airbaginduzierte Augenverletzungen durch Sehhilfen stellen jedoch eine Grauzone mit bislang sehr wenig publizierten Daten sowie einem bisher ungenutzten Optimierungspotenzial bezüglich des Brillengestells, der Brillengläser und Airbagmodule dar.

Im Rahmen einer Expertenrunde bei der Dekra in Neumünster 2006 (Frontalaufprall-Meeting), kamen Allgemeinmediziner, Ophthalmologen und Ingenieure aus der Fahrzeugsicherheit zu dem Ergebnis, dass es gerade bei Fahrzeuginsassen, die eine Brille tragen, zu airbaginduzierten Verletzungen im Gesichtsbereich, speziell zu Verletzungen im Augenbereich, kommen kann. Aufgrund dieser Problematik wird in der vorliegenden Arbeit das Ziel gesetzt, eine experimentelle Komponentenmethode bzw. eine Versuchsmethode auf Basis eines Pkw-Frontalaufpralls zu entwickeln.

Diese Methode erlaubt es, Grundlagenforschungen über Brillen und Gläser durchzuführen und bei festgestellten Defiziten Lösungsmöglichkeiten für eine Produktoptimierung geben zu können. Mögliche Augenverletzungen durch Brillen, die mitunter zur Erblindung führen können und damit zu einer immensen Einschränkung der Lebensqualität, können so bereits im Vorfeld vermeidbar gemacht werden.

Die Brillenindustrie kann mithilfe entsprechender Erkenntnisse Vorbeugemaßnahmen treffen und Konstruktionsänderungen an der Brille vornehmen, um Verletzungen des Sehapparates zu limitieren oder fast gänzlich auszuschließen.

Seitens der Airbaghersteller besteht noch in der Entwicklungsphase die Möglichkeit, an Airbagmodulen das Verletzungspotenzial, speziell im Gesichtsbereich, untersuchen zu lassen und Optimierungsmöglichkeiten zu entwickeln.

Dem Käufer eines Automobils könnte dann ein Produkt geliefert werden, das einerseits Schutzpotenzial bei einem Pkw-Frontalaufprall bietet und andererseits die Verletzungen durch passive Sicherheitssysteme, speziell durch den Airbag, nahezu ausschließen kann.

Eine explizit formulierte Fragestellung erfolgt in Kapitel 1.2.

## **1.1 Stand der Forschung**

Eine Augenverletzung infolge eines entfalteten Airbags wurde erstmals 1995 durch Gault et al. beschrieben [4]. Sie arbeiteten heraus, dass das Brillentragen beim Autofahren ein erhöhtes Risiko für Augenverletzungen darstellt. Ihre Aussagen stützten sich auf mehrere in ihrer Augenklinik behandelte Patienten. Infolge eines Frontalunfalls mit Airbagauslösung erlitten die Patienten als Insassen eines Pkw erhebliche Verletzungen im Augenbereich und als Folge dessen eine erhebliche Einschränkung ihrer Sehkraft.

Duma et al. [5] beschrieben 1996 25 Fälle von Augenverletzungen bei einem Pkw-Frontalaufprall. Die Insassen hatten bei verschiedenen Frontalaufprallsituationen aufgrund einer Airbaginteraktion schwere Gesichts- bzw. Augenverletzungen erlitten. Das Tragen von Brillen stellte nach Meinung der Autoren ein erhöhtes Risiko in Bezug auf Verletzungen durch den entfalteten Airbag dar.

Tsuda et al. [9] zeigten 1999, dass durch die serienmäßige Ausstattung von Neufahrzeugen mit Airbags gerade auf der Fahrer- und Beifahrerseite die Verletzungen im Gesichtsbereich, speziell im Bereich des Auges, zunehmen. Ihre Untersuchung stützte sich auf Fälle in den Jahren 1996 bis 1998 in ihrer Augenklinik.

Schrader et al. [6] untersuchten 2000 in einer Studie, wie sich die Schwere von Augenverletzungen beim Pkw-Unfall in den letzten 33 Jahren verändert hatte. In Bezug

auf den Airbag sahen die Autoren ein erhöhtes Risiko durch Gegenstände zwischen Insassen auf der Fahrer- bzw. Beifahrerseite und Airbagmodul, z. B. wenn während der Fahrt eine Brille getragen wurde.

Lee et al. [10] berichteten 2001 über Ergebnisse einer retrospektiven Fallstudie. Von 94 Patienten mit einer airbaginduzierten Augenverletzung nach einem Pkw-Frontalaufprall erlitten 24 eine bilaterale Augenverletzung, von denen 15 Patienten während des Unfalls eine Brille getragen hatten. Das bedeutet, in den Fällen mit bilateralem Schaden ist in über 50 % eine Brille getragen worden. Die am häufigsten aufgetretenen Verletzungen waren Kornea-Abrasionen, Traumata der Augenlider und Hyphaemata.

Lehto et al. [7] untersuchten 2003 110 Fälle mit Augenverletzungen nach Unfällen mit Airbagauslösung. Sie äußerten sich dahingehend, dass Augenverletzungen sehr selten dokumentiert wurden. Als Grund wurde angegeben, dass im akuten Notfall vorrangig die vitalen Funktionen stabilisiert wurden und anschließend erst der Gesichtsbereich bzw. nach der Behandlung im Krankenhaus eine Augenverletzung behandelt wurde. Weiterhin geht aus dieser Publikation hervor, dass einige Pkw-Insassen Verletzungen aufgrund spitzer Gewalteinwirkungen, meist Brillenglas, im Gesichts- bzw. Augenbereich davontrugen.

Klanner et al. [3] untersuchten 2004 928 Frontinsassen, von denen 164 beim Unfallereignis mit Airbag-Aktivierung eine Brille trugen, 4 eine Zigarette rauchten und 9 Personen einen Gegenstand vor sich hatten. Mit Ausnahme von zwei Brillenträgern (1 Fahrer und 1 Beifahrer), erlitten alle hier betrachteten Insassen keine Verletzungen durch den Airbag. Die Autoren konnten zwar nicht genau ermitteln, um welche Brillenart es sich dabei handelte, vermuteten aber eine Sonnenbrille aus Kunststoffmaterial.

Weiterhin haben sie während eines Pkw-Frontalaufprallversuchs einem Dummy eine Sonnenbrille aufgesetzt, die während des Versuchs vom Kopf des Dummy geschleudert wurde und im Fahrzeuginnenraum verblieb.

Rother et al. [11] bemerkten 2005, dass sich auf ophthalmologischem Gebiet die Einzelfallberichte über Augenverletzungen häufen würden und sie in diesem Zusam-

menhang von airbagvermittelten Schädigungen ausgingen. Das Risiko für offene Augenverletzungen sei bei Brillenträgern dreimal höher als bei Insassen, die keine Brille tragen.

Die Expertenmeinungen des Allianzentrums für Technik in Ismaning und des ADAC Zentrums für Technik in Landsberg am Lech reichen dahin, dass sich die Brille beim Pkw-Frontalaufprall aufgrund ihrer Trägheit frühzeitig vom Kopf des Insassen löst und während der Airbaginteraktion keine Rolle mehr spielt [3].

Alle hier zitierten Autoren weisen eindringlich darauf hin, dass im Bereich der Interaktion zwischen Airbag und Brille beim Pkw-Frontalaufprall Forschungsaktivitäten unternommen werden müssten, um die Gefahr von Verletzungen im Gesichtsbereich durch Sehhilfen zu minimieren.

Als Teststandard für Airbagmodule zur Überprüfung ihrer Funktionalität gibt es in der Automobil- und Zuliefererindustrie ein bewährtes Verfahren [12]. Für die Überprüfung von Airbagmodulen wird der Body-Block-Versuch nach ECE-R12 als technisches Prüfmittel eingesetzt (Abbildung 4, Abbildung 5). Bei diesem Verfahren liegt der Fokus auf dem oberen Brustbereich des Insassen. Der Gesichtsbereich wird dabei nahezu nicht abgedeckt. Bei der Bodyblockprüfung wird der Torso eines 50-%-Mannes (ca. 35 kg) verwendet und auf einer freien Flugbahn gegen ein Lenkrad geschleudert. Die Prüfungen finden mit bzw. ohne Airbagzündungen statt und werden bei Geschwindigkeiten von 19 km/h bis 30 km/h durchgeführt. Es erfolgt ein Vergleich der aufgenommenen Parameter und es kann eine Aussage über die Funktionalität des Airbag getroffen werden.

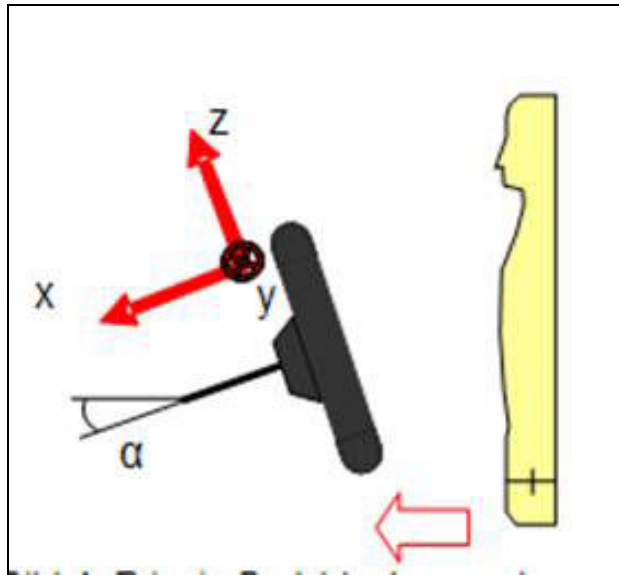


Abbildung 4: Bodyblock ECE-R12, skizzierter Versuchsaufbau



Abbildung 5: Bodyblock-ECE-R12, Dynamic Test Center DTC, Vauffelin (CH)

### 1.2 Ziel der Arbeit

Wie bereits einleitend erwähnt soll eine experimentelle Komponentenmethode entwickelt werden, die Brillen- und Brillenmaterialien beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung auf ihre Crashtauglichkeit untersucht. Der Eintauchvorgang des menschlichen Kopfes bzw. des Dummys in den ausgelösten Airbag soll unter realen Pkw-Frontalaufprallbedingungen auf die Versuchsmethode übertragen werden.

Die Testbedingungen in Anlehnung an das European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) und das Research Council for Automobile Repairs (RCAR) werden dabei eingehalten.

Brillenmodelle, die auf dem deutschen Brillenmarkt erhältlich sind, werden auf ihre Crashtauglichkeit überprüft, um eine Aussage treffen zu können, welche Art von Brillen tendenziell die größte Verletzungsgefahr bei einem Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung darstellen.

Der große Vorteil dieser experimentellen Komponentenmethode besteht darin, Brillen und Linsenmaterial unter standardisierten Laborbedingungen kostengünstig zu testen. Andernfalls müsste ein realer Crashtest zur Auswertung der Brillenmaterialien herangezogen werden, was unverhältnismäßig hohe Kosten in der Entwicklungsphase der Brillenmodelle nach sich ziehen würde.

Weiterhin kann die Airbagindustrie ihre Prototypen in der frühen Entwicklungsphase auf gesichtrelevante Verletzungsmuster untersuchen lassen und gegebenenfalls Änderungen, die zu einer Reduktion der Verletzungen beitragen, vornehmen.

Die folgenden Fragen sollen in der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

- Wie ist das Bewegungsverhalten bzw. die Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagentfaltung?
- Welche Brillen bzw. Brillenmaterialien stellen beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagentfaltung die höchste Gefahr für Verletzungen im Gesichtsbereich dar bzw. zeigen die höchste Bruchgefahr?

Daraus haben sich für diese Arbeit folgende Ziele ergeben:

- Die Ermittlung von Randbedingungen verschiedener Pkw-Frontalaufprallversuche zur Übertragung auf eine experimentelle Komponentenmethode (RCAR, EuroNCAP).
- Die Übertragbarkeit und die Entwicklung einer Komponentenmethode zur Untersuchung von Brillen und Brillenmaterialien.
- Die Untersuchung der Bruchfestigkeit von Brillen- und Brillenmaterialien mit der experimentellen Komponentenmethode.



Schlussendlich sollen die Ergebnisse und die entwickelte experimentelle Methode dazu beitragen, die Sicherheit der Fahrzeuginsassen weiter zu verbessern und damit die Anzahl der Verletzungen durch einen auslösenden Airbag bei einem Verkehrsunfall, gerade im Gesichtsbereich, zu reduzieren.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Das Auge

In diesem Kapitel werden die relevanten Bereiche des Auges in Bezug auf ihre Verletzungen durch die Interaktion zwischen Airbag und Brille dargestellt. Es handelt sich dabei um Bereiche am und im vorderen Bereich des Auges. Bedingt durch eine mechanische Gewalteinwirkung und die anatomische Exposition des Auges besteht dort die größte Gefahr, eine Verletzung zu erleiden [13, 14, 15, 16].

Das Auge ist für den Menschen das Sinnesorgan zur optischen Wahrnehmung. Es liegt in der knöchernen Orbita, die dem Auge begrenzt Schutz vor äußeren mechanischen Einflüssen bietet.

Die axiale Größe, der Längsdurchmesser des Auges, beträgt bei einem erwachsenen Menschen durchschnittlich 24 mm. Der Augapfel besteht aus einer mehrschichtigen Wand und dem Augapfelinhalt (Abbildung 6). Erstere besteht aus (von ventral nach dorsal):

- Lederhaut (Sklera) und Hornhaut (Cornea) bilden die formstabile Außenhülle des Auges. An ihr setzen alle sechs Augenmuskeln an.
- Die Aderhaut (Choroidea) bildet zusammen mit Regenbogenhaut (Iris) und Ziliarkörper die mittlere Schicht des Augapfels. Sie wird auch als Gefäßhaut des Auges (Uvea) bezeichnet.
- Die Netzhaut (Retina) bildet die innere Schicht des Auges, sie besteht aus dem sensorischen Teil und dem retinalen Pigmentepithel.

Den Augapfelinhalt bilden Ziliarkörper, Linse und Glaskörper.

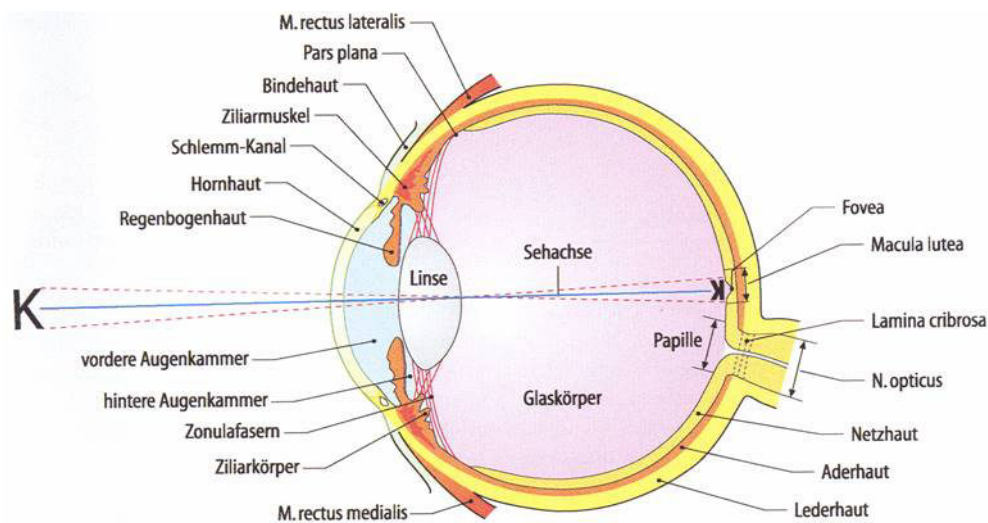


Abbildung 6: Aufbau Auge [13]

An vorderster Stelle des Augapfels befindet sich die Hornhaut. Durch ihre Exposition ist sie die mit am häufigsten betroffene Region bei Verletzungen am Auge durch mechanische Gewalteinwirkung. Wegen ihrer Avaskularität ist sie das am häufigsten transplantierte Gewebe in der BRD [17].

Die Hornhaut besteht aus einem mehrschichtigen unverhornten Plattenepithel und hat mit 43 dpt den höchsten Anteil an der Gesamtbrechkraft (60 dpt) des Auges. Sie ist in die Lederhaut eingefasst. Der Übergangsbereich von Cornea zu Sklera heißt Limbus Corneae. Dort werden Stammzellen von Endothel und Epithel der Hornhaut gespeichert, die für deren regelmäßige Erneuerung verantwortlich sind. Bis zu einem gewissen Grad können die Stammzellen die Hornhaut regenerieren. Bei zu großer Zerstörung ist dies allerdings nicht mehr möglich.

Die Hornhaut hat folgende Funktionen:

- Epithel: Barriere gegen Bakterien und Fremdstoffe,
- Endothel: Pump- und Abdichtfunktion.

Das mehrschichtige Plattenepithel der Hornhaut regeneriert nach Beschädigung meist innerhalb weniger Stunden. Epitheldefekte werden durch Zellverschiebungen und Zellteilungen wieder rasch geschlossen. Dies setzt allerdings voraus, dass die Limbusstammzellen nicht zerstört oder beschädigt sind. Die Zerstörung der Stamm-

zellen (z. B. Verätzung durch Airbaggage) führt zu gravierenden Heilungsstörungen mit Überwachsen von Bindehautzellen auf die Hornhaut.

Die regelmäßige Oberfläche der Hornhaut und ihre Transparenz sind für die scharfe Abbildung von Gegenständen auf der Netzhaut von großer Bedeutung. Die avaskuläre Hornhaut wird von außen durch den Tränenfilm und von innen durch das Kammerwasser ernährt (Abbildung 7).

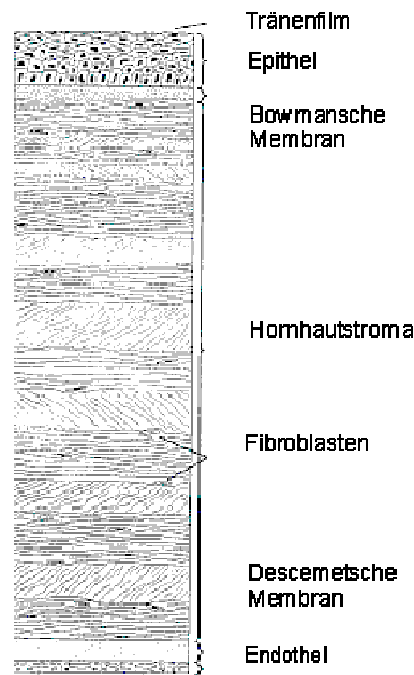


Abbildung 7: Aufbau Hornhaut mikroskopisch [13]

Bei Zerstörung des Epithels ist die Barrierefunktion gegen von außen eindringende Bakterien nicht mehr gewährleistet.

Sinkt die Dichte des Endothelgewebes durch Verletzung oder Erkrankung unter 300 Zellen/mm<sup>2</sup> (normal 2500 Zellen/mm<sup>2</sup>) ist die Pumpfunktion der Endothelzellen gestört. Durch Wassereinlagerung kommt es zu Quellung des Hornhautstromas und die Hornhaut wird trübe.

Neben der Hornhaut im vorderen Augapfelbereich stellt die Lederhaut im seitlichen und hinteren Bereich des Augapfels die formstabile Außenhülle des Augapfels. Die Lederhaut ist eine undurchsichtige, mit wenigen Blutgefäßen durchzogene Gewebsschicht. Sie schützt das Innere des Auges vor mechanischen Beanspruchungen und gibt dem Auge seine Form und Gestalt.

Die Augenlider sind dem Augapfel vorgelagert. Das Lid schützt das Auge vor äußeren mechanischen sowie starken optischen Einflüssen (z. B. Fremdkörper, Blen-

dung). Durch Letztere und durch starke akustische Reize wird ein Lidschlussreflex ausgelöst (Latenzzeit/Reaktionsszeit ~ 250 ms).

Gleichzeitig dienen die Lider zusammen mit den Tränendrüsen (Meibom-Drüsen) und ihrer produzierten Flüssigkeit als „Scheibenwischanlage“ und entfernen Bakterien sowie Ablagerungen auf der Hornhaut. Durch die Befeuchtung mittels Tränenfilm erlangt die Hornhaut ihre optimalen optischen Eigenschaften.

Die Tränenorgane bestehen aus einem produzierenden Anteil und einem abtransportierenden Anteil und liegen unter dem oberen äußeren Orbitarand. Der Tränenfilm besteht von außen nach innen aus einer Lipidschicht, einer wässrigen Schicht und einer Muzinschicht. Er ernährt durch Diffusion die Hornhaut und schützt sie vor Bakterien.

Der M. obicularis oculi bewirkt bei der Kontraktion, dass der Lidschluss nicht gleichzeitig, sondern von temporal nach nasal erfolgt. Dadurch wird die Tränenflüssigkeit wie bei einem Scheibenwischer zum inneren Lidwinkel transportiert.

Die als „Tränenpünktchen“ bezeichnete Zugangsöffnung zum Tränenkanal nimmt die Flüssigkeit auf und gibt sie über den Tränenkanal in den Tränensack weiter. Von hier gelangt die Flüssigkeit über den Tränen-Nasen-Gang in die Nasenmuschel.

## **2.2 Augenverletzungen**

Eine Verletzung nach Verkehrsunfällen wird häufig nach AIS (Abbreviated Injury Scale) eingestuft [18]. Die AIS gibt die Verletzungsschwere nach einer Einzelverletzung an. Verletzungen werden nach Körperregion, Verletzungstyp, anatomischer Struktur und der Verletzungsschwere kodiert. Die Kodierung reicht von 1 (gering) bis 6 (maximal, nicht überlebbar). Eine Augenverletzung wird meist mit AIS 2 bewertet, dagegen eine Enukleation des Auges mit AIS 3. Eine höhere Kodierung wird nicht erreicht. Im Normalfall ist eine Verletzung am Auge nicht lebensbedrohlich.

Es wird zwischen penetrierenden und perforierenden Augenverletzungen unterschieden. Penetrierende Augenverletzungen sind Schnitt- und Stichverletzungen aufgrund einer mechanischen Gewalteinwirkung durch Objekte wie Glassplitter, Metallsplitter etc., die ins Auge eingedrungen und ggf. intrakular verblieben sind.

Perforierende Augenverletzungen sind Stichverletzungen aufgrund einer mechanischen Gewalteinwirkung, z. B. durch Glassplitter, Metallsplitter etc., die ins Auge eingedrungen sind und zusätzlich noch die Hinterwand des Auges durchschlagen haben. Vor Einführung der Gurtpflicht (1976) kam diese Art von Verletzung häufig bei Windschutzscheibenverletzungen vor. Seit Einführung der Gurtpflicht sind diese Verletzungen deutlich zurückgegangen [6, 13, 20]. Bei Brillenglas- und auch anderen Glasverletzungen handelt es sich meist um eine penetrierende Augenverletzung [20].

Wie bereits erwähnt ist die Hornhaut durch ihre anatomische Exposition die am häufigsten zerstörte Struktur am Auge im Zusammenhang mit Verletzungen durch Airbagauslösung. Ist eine Operation notwendig, kommt es durch Naht- und Narbenzug oftmals zu einem irregulären Astigmatismus, auch Brennpunktlosigkeit genannt, die durch die unregelmäßige Krümmung der Hornhaut dazu führt, dass die beiden optischen Ebenen nicht senkrecht aufeinanderstehen. Dadurch kann die Sehstärke stark beeinflusst werden, eine Hornhauttransplantation ist meist notwendig [10, 16].

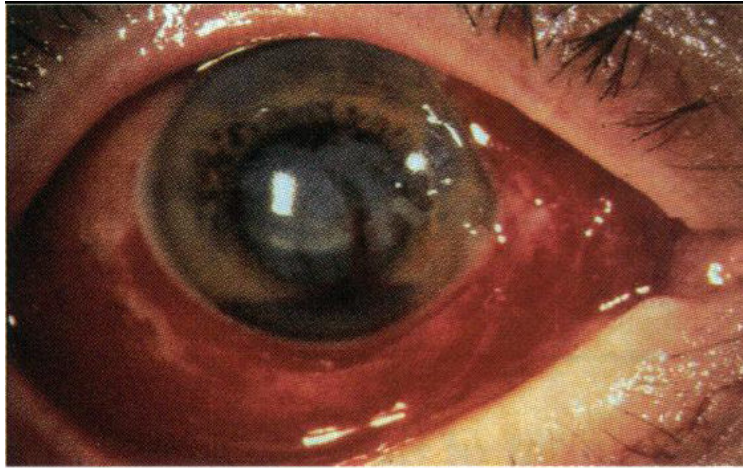


Abbildung 8: Verletzung des Auges (Abrasio der Cornea und Hyphaema) durch Airbag-Brilleninteraktion [10]

Abbildung 8 zeigt eine Verletzung des Auges beim Tragen einer Brille während eines Pkw-Frontalaufpralls mit Airbagauslösung. Die Aufprallgeschwindigkeit des Fahrzeugs betrug dabei 25 km/h. Eine corneale Abrasion und eine Vorderkammerblutung waren die Folge. Durch eine anschließende Operation und eine lange Behandlungszeit des Auges konnte eine 20-prozentige Sehkraft des Auges wiederhergestellt werden [10].

Oftmals sind noch Bindehaut und Augenlider mitbetroffen. Aufgrund ihrer Exposition im vorderen Bereich des Auges sind sie als erste der mechanischen Gewalteinwirkung ausgesetzt (AIS 1, 2). Dabei sind von besonderer Bedeutung:

- Lidverletzungen mit durchtrennter Lidkante,
- Lidabrisse im inneren Lidwinkel mit abgerissenen Tränenröhrchen,
- Durchtrennung der Tränenröhrchen durch Schnittverletzungen der Bindehaut.

Nach einer Verletzung an einem Auge kann es noch Jahre später zu einer sympathischen Ophthalmie des ursprünglich gesunden Auges kommen. Gewebe des verletzten Auges (Uvea, Linse, Netzhaut) wirken als Antigene und lösen eine Autoimmunerkrankung beim gesunden Auge aus [13, 15].

## 2.3 Brillen und Materialien

Brillenfassungen unterscheiden sich in ihrem Aussehen und in ihrem Material.<sup>1</sup> Die Vielfalt lässt sich in drei Kategorien zusammenfassen. Auf dem deutschen Markt existieren Vollrand-, Tragraund- und randlose Brillenfassungen.

Eine Brille besteht aus ihrer Fassung bzw. dem Gestell und ihren Linsen bzw. Gläsern. Beides zusammen bildet das Brillenmodell. Die Befestigung der Linsen kann abhängig von der jeweiligen Brillenfassung auf unterschiedliche Arten erfolgen.

Bei der Vollrandfassung (Abbildung 9) sind die Linsen in das Gestell mittels Nut- und Federsystem eingelassen. Bei Tragraundfassungen (Abbildung 10) ist ein Teil der Linse in das Gestell eingelassen, während der andere Teil der Linse meist mittels eines kleinen Metalldrahts an der Unterseite befestigt ist. Bei randlosen Brillenmodellen (Abbildung 11) sind die Linsen über Bohrungen oder Verklebungen direkt am Gestell befestigt.



Abbildung 9: Brillenmodell (Vollrand); struktureller Aufbau [36]

<sup>1</sup> Im Bereich Metall: Neusilber, Nickel, Titan, Beryllium, Bronze 48, Monel, Chrom, Silber, Gold  
Im Bereich Kunststoff: Thermoplaste, Duroplaste, Cellulose-Acetat, Optyl u. a.





Abbildung 10: Brillenmodell (Tragrand); struktureller Aufbau [36]

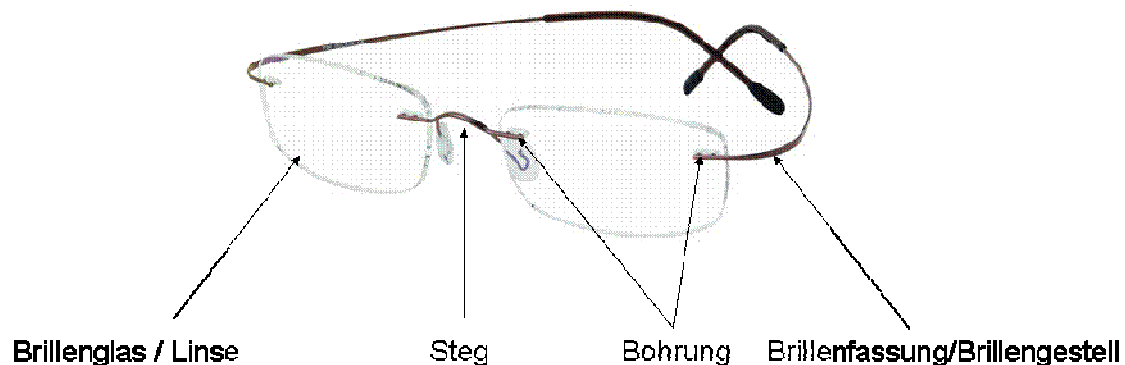


Abbildung 11: Brillenmodell (randlos); struktureller Aufbau [36]

Betrachtet man die Fassungen hinsichtlich ihres Materials, kann eine Unterteilung in Kunststoff- und Metallfassungen sowie eine Kombination beider Materialgruppen erfolgen [38]. Da die Stabilität der Brille von ihrer strukturellen Form abhängig ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Stabilität der gesamten Brille von einer Vollrandfassung über die Tragrand- bis hin zur randlosen Fassung sinkt. Gründe dafür liegen im Aufbau der Brillenfassung selbst und der Art der Befestigung des Glases in oder an der Fassung. Diese Kriterien bestimmen die Verteilung von Zug- und Druckkräften über die gesamte Fassung.

### 2.3.1 *Brillenfassungen*

Randlose Brillen sind wegen ihres Aufbaus am instabilsten [38, 39]. Während Vollrand- und Tragrandfassungen aus einem Stück gearbeitet sind, wird das randlose Gestell aus mindestens drei Einzelteilen – dem Steg und den beiden Seitenteilen – gefertigt. Die Befestigung der Gläser erfolgt nicht mehr über eine Nut in der Fassung, sondern über punktuelle Befestigungen mittels Verschraubungen, Steckverbindungen oder Kerb- und Stiftverbindungen (Abbildung 12). Hierbei werden Kräfte, die auf die Brille wirken, nicht mehr über den Fassungsrand aufgenommen und weitergeleitet, sondern punktuell auf das Brillenglas übertragen, das nicht nur den Druckkräften der Befestigung widerstehen, sondern auch alle anderen auf sie wirkenden Kräfte absorbieren muss. Dabei unterscheidet sich die Stabilität einer randlosen Brille je nach Art der Befestigung. Starre Verschraubungen bieten gegenüber einfachen Steckverbindungen aus Kunststoffhülsen größeren Halt für die Gläser und demnach für die gesamte randlose Brille.

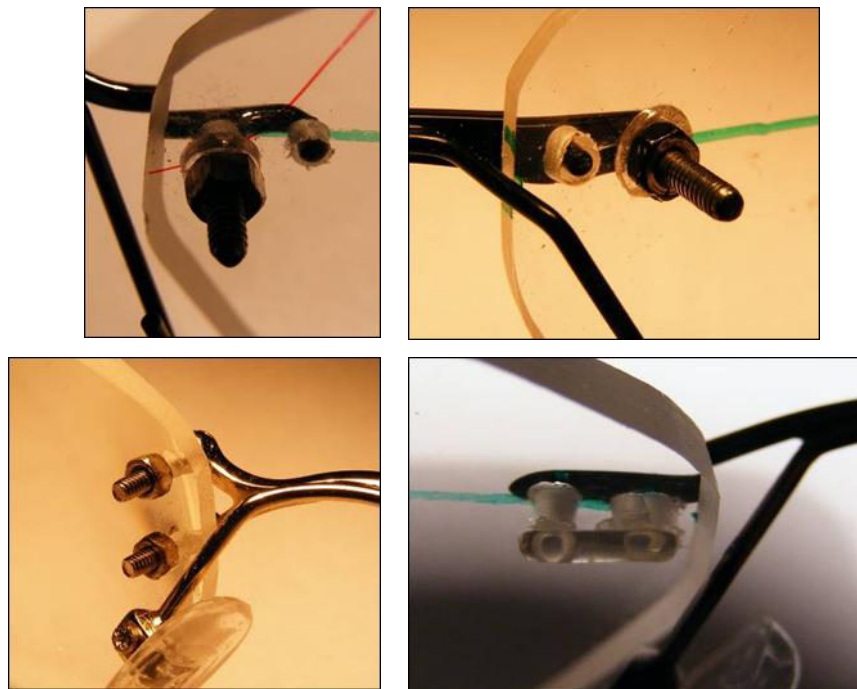


Abbildung 12: Beispiele von Glasbefestigungen bei randlosen Brillen

### 2.3.2 *Brillengläser*

Unabhängig von der Fassungsform kann jede Brille mit Silikat- bzw. Glas- oder Kunststoffgläsern verglast werden [38, 39]. Silikatgläser werden häufig (99,9 %) in Vollrand- und Tragrandfassungen eingearbeitet. Randlose Brillen werden nahezu nie

mit Silikatgläsern bestückt. Silikat ist zu spröde, um permanent allen Kräften zu widerstehen, die durch den täglichen Gebrauch auf eine Brillenfassung einwirken. Kunststoffgläser hingegen können ausnahmslos in jeder Fassung verarbeitet werden. Das häufigste dabei verwendete Material ist das organische Glas CR-39.

Um ein Brillenglas zu beurteilen, vergleicht man seine Eigenschaften. Die wichtigsten Charakteristika sind die Brechzahl oder Brechungsindex und die Dichte. Eine einfache Einteilung der Gläser erfolgt über die Brechzahl. Bei den Kunststoffgläsern unterscheidet man fünf Arten: das Polycarbonatglas als Sicherheitsglas mit der Brechzahl  $n = 1,58$ , das normalbrechende ( $n = 1,5$ ), das mittelbrechende ( $n = 1,6$ ), das hochbrechende ( $n = 1,7$ ) und das sehr hochbrechende Glas ( $n = 1,74$ ). Mit steigender Brechzahl erhöhen sich die Dichte und damit das Gewicht. Abbildung 13 zeigt die Sprödigkeit in Bezug auf die Bohrbarkeit eines Brillenglases im Vergleich zu den Brechungsindizes der Firma SEIKO Optical Europe GmbH [34, 35].

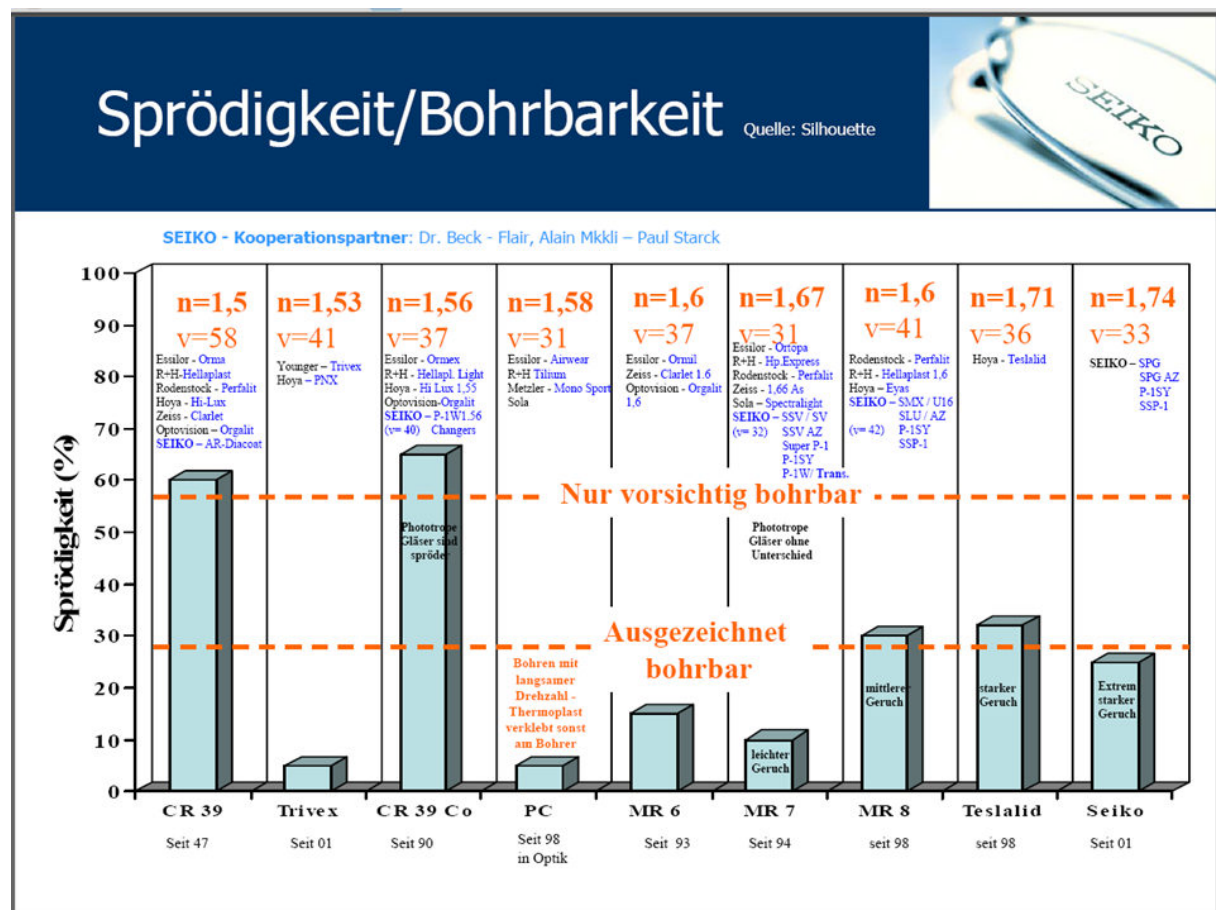


Abbildung 13: Sprödigkeit/Bohrbarkeit eines Brillenglases im Vergleich zu seinen Brechungsindizes

[34]

### 2.3.3 Brechungsindex (Brechzahl)

Wenn ein Lichtstrahl aus der Luft in ein Brillenglas eintritt, verringert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtstrahls. Der auch Brechzahl genannte Brechungsindex ist eine dimensionslose physikalische Größe und gibt das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  zur Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_m$  des Lichts im Medium an.

Die Brechindex  $n$  ist definiert mit  $n = \frac{c_0}{c_m}$ .

Je höher der Brechungsindex  $n$  ist, desto langsamer wird das Licht [39]. Glasmaterialien mit einem höheren Brechungsindex erzeugen eine stärkere Geschwindigkeitsabnahme, demnach eine größere Brechung. Man nennt sie höherbrechend. Brillengläser mit einem größeren Brechungsindex erzeugen somit bei gleicher Form eine größere Brechung und damit eine höhere optische Wirkung (Stärke) als niedrigbrechende Gläser. Ein hoher Brechungsindex ermöglicht auch bei stärkeren Fehlsichtigkeiten dünne und ästhetische Gläser. Je höher der Brechungsindex des Materials, desto dünner ist ein Glas bei gleicher Brechkraft.

## 2.4 Experimentelle Simulation (Laborversuch)

Die Zielsetzung der experimentellen Simulation (Laborversuche, Crashversuche, Schlittenversuche, Komponentenversuche etc.) in der Fahrzeugtechnik bzw. Fahrzeugsicherheit besteht darin, passive Sicherheitsmaßnahmen, Deformationsverhalten von Fahrzeugen sowie Kinematik und Belastungen von Insassen unter realistischen Bedingungen nachzubilden, um Aussagen über entsprechendes Verhalten treffen zu können.

Da aufgrund der Vielzahl der möglichen Unfallkonstellationen nicht jeder Unfall nachgefahren werden kann, werden Unfallsituationen nach international festgelegten Vereinbarungen nachgebildet. Zur Repräsentation verschiedener Unfalltypen unterscheidet man zwischen Frontal-, Seiten- und Heckkollisionen [21].

### 2.4.1 Frontalaufprallversuche

Bei frontalen Pkw-Aufprallversuchen, sogenannten Full Size Crash Tests, werden die Fahrzeuge auf der Crashbahn mittels einer Beschleunigungseinrichtung aus dem

Stand auf die vorgesehene Geschwindigkeit gebracht und prallen gegen ein definiertes Hindernis, das starr oder deformierbar ist und eine volle oder nur eine teilweise Überdeckung bereitstellt. 100 % Überdeckung bedeutet, das Fahrzeug prallt im rechten Winkel mit der gesamten Breite, senkrecht zur Bewegungsrichtung auf eine Barriere. In der nachfolgenden Tabelle 1 ist ohne Anspruch auf Vollständigkeit die Vielzahl der heute üblichen Versuchskonstellationen für Frontalkollisionen dargestellt.

Geltungsber.	Barriere	Überdeckung	Geschw. [km/h]	Zielsetzung
Europa	deformierbar	40 % Fahrers.	56 / 64	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
USA, Kanada	0°, starr	100 %	48... 53	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
USA	30°, starr	100 %	48... 53	Struktur, ISS, Dummy-Belastung
NCAP (USA)	0°, starr	100 %	56	Rating-Versuch zur passiven Sicherheit
AMS	15° links, starr	50 % Fahrers.	55	Rating-Versuch zur passiven Sicherheit
Europa	10°, starr	40 % Fahrers.	15	Rep.freundlichkeit, VK-Vers.einstufung
USA	starres Pendel	seitlich, mittig	2,5 / 4	am Stoßfänger kein Schaden zulässig
Kanada	starres Pendel	seitlich, mittig	4,8 / 8	keine Funktionsbeeinträchtigung zulässig

Tabelle 1: Versuchsmethoden zu Frontalkollisionen [21]

Die Tests haben im Wesentlichen die Überprüfung der Deformations- und der Zellenstruktur sowie der Insassenschutz-Systeme (ISS) zum Ziel. Als Beurteilungskriterium dienen die Dummy-Belastungswerte, die Aufschluss darüber geben, welche Kräfte und Beschleunigungen auf Insassen im Falle eines Pkw-Aufpralls wirken.

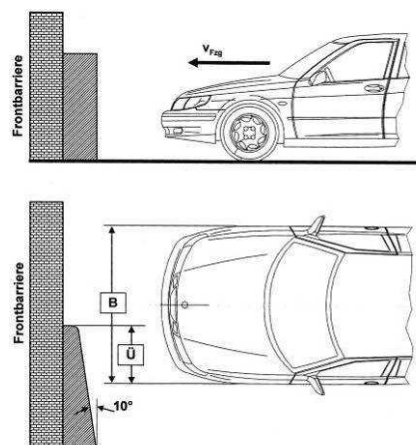


Abbildung 14: Versuchsanordnung beim Pkw-Frontalaufprall [21]

#### 2.4.1.1 EuroNCAP (European New Car Assessment Programme)

Verschiedene voneinander unabhängige Institutionen haben sich in Europa zum EuroNCAP (European New Car Assessment Programme) zusammengeschlossen [8, 21]. Eine Zertifizierung zur Durchführung von Pkw-Aufprallversuchen besitzen in der Bundesrepublik Deutschland u. a. der ADAC, die BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen) und der TÜV Rheinland. Diese Institutionen haben sich zur Aufgabe gemacht, neu auf den Markt kommende Fahrzeuge auf ihre Crashtauglichkeit zu überprüfen. Neben dem Schutz erwachsener Insassen gehören Kindersicherheit (auf der Rücksitzbank) sowie Fußgängerschutz zum Bewertungsprogramm. Die Fahrzeuge werden mit null bis fünf Sternen bewertet und geben dem Endverbraucher einen Überblick über die Fahrzeugsicherheit des Pkw bei verschiedenen Unfallkonstellationen. Das EuroNCAP- sowie das RCAR- (Research Council for Automobile Repairs) Programm werden strikt nach einem vorgegebenen Protokoll durchgeführt. Darin sind alle Bereiche, die im Versuch zum Einsatz kommen (Messtechnik, Dummy etc.) genau definiert, damit alle Versuchsinstitutionen die gleichen Voraussetzungen im Versuch erfüllen und eine gute Reproduzierbarkeit gewährleistet ist.

#### 2.4.1.2 RCAR (Research Council for Automobile Repairs)

Ziel des RCAR (Research Council for Automobile Repairs) ist die Kostendämpfung im Versicherungswesen [22]. Die Fahrzeuge sollen nach Unfällen im Niedriggeschwindigkeitsbereich  $\Delta V \sim 22 \text{ km/h}$  keine allzu großen Schäden aufweisen und reparaturfreundlich sein. Die Fahrzeuge werden einheitlich nach einer vorgegebenen Testprozedur verschiedenen Unfallkonstellationen unterzogen. Anschließend wird der Schaden gutachterlich erfasst und repariert. Daraus wird dann die spätere Schadensklasseneinteilung der Fahrzeuge für die Versicherungen erstellt.

#### 2.4.1.3 Physikalische Grundlagen Pkw-Frontalauprall

Die Bewegungen beim Pkw-Frontalaufprall werden durch die vektoriellen Größen Beschleunigung ( $\vec{a}$ ), Geschwindigkeit ( $\vec{v}$ ) und Weg ( $\vec{s}$ ) definiert. Es handelt sich um vektorielle Größen, die in einer, zwei oder drei Dimensionen vorliegen. Die Ge-

geschwindigkeit ist die zurückgelegte Strecke pro Zeiteinheit. Sie wird beschrieben durch:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Und die Beschleunigung des Fahrzeuges ist definiert als die Geschwindigkeits-änderung  $\Delta v$  pro Zeitintervall.

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}(t)}{dt}$$

Im Kontext dieser Arbeit tritt Beschleunigung häufig als Verzögerung auf. Diese Begriffe sind physikalisch austauschbar. Führt z. B. ein Fahrzeug auf ein anderes stehendes auf, so sind die Kräfte beider Fahrzeuge gleich (Actio = Reactio). Ob die Geschwindigkeit zunimmt oder abnimmt, ist eine Frage des Bezugssystems. Im Folgenden kann der Begriff der Beschleunigung auch als Verzögerung beschrieben werden. Ein Kopf, der in den Airbag eintaucht, erfährt eine Verzögerung weil er abgebremst wird.

Beim Pkw-Frontalaufprall wird eine Arbeit  $W$  dadurch verrichtet, dass eine Kraft  $F$  auf einen Punkt eines Körpers einwirkt, dieser der Kraft nachgibt und eine Strecke  $\vec{s}$  zurücklegt.

$$W = \vec{F} * \vec{s}$$

Da die Kraft nicht konstant, sondern von einem Weg  $s$  abhängig ist und im Verlauf des Weges variieren kann, gilt folgender Zusammenhang:

$$W(s) = \int_0^s F(x) dx$$

Für die Bewegungsenergie  $T$  des Fahrzeuges bzw. des Insassen gilt:

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

In allen Fahrzeug- sowie Komponentenversuchen werden nach SAE-J211-Vorschrift (SAE – Society of Automobile Engineers) rechtwinklige Koordinatensysteme verwendet [23]. Die x-Achse entspricht der Fahrzeuglängsachse, die y-Achse der Fahrzeugquerachse und orthogonal dazu die z-Achse.

### 2.4.2 Komponentenversuche

Das Ziel von Komponentenversuchen besteht darin, Untersuchungen zur Funktionalität von Subsystemen zur passiven Sicherheit vorzunehmen [8, 21]. Diese können sich auf das Deformations- und Intrusionsverhalten äußerer oder innerer Strukturen beziehen, aber auch die Funktion und Wirkungsweise von Komponenten des Insassenschutzsystems zum Ziel haben. Dazu werden verschiedene Baugruppen wie z. B. Airbagmodule auf eine Rohkarosserie installiert oder Autositze auf einen Schlitten montiert und einem Versuch unterzogen. Der Vorteil besteht u. a. in der schnellen Wiederholbarkeit der Versuche sowie in der deutlichen Kostenersparnis. Es wird explizit nur die Komponente getestet, die von Interesse ist und es muss kein komplettes Fahrzeug einem Test unterzogen werden.



Abbildung 15: Komponentenversuch dynamischer Sitztest, Heckaufprall für die Sitzbewertung zur Prävention von Halswirbelsäulenverletzungen

### 2.4.3 Anthropomorphic Test Device (ATD)

Wesentliche Kriterien für die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen sind die zu erwartende Verletzungswahrscheinlichkeit und die Verletzungsschwere von Verkehrsteilnehmern bei Unfällen. Um realistische Ergebnisse für das reale Unfallgeschehen zu erhalten, nimmt der Dummy eine wichtige Sonderstellung in der Crashanalyse ein. Ein Dummy ist eine Messpuppe, die mithilfe von Sensoren Beschleunigungen und Kräfte, die auf den menschlichen Körper während eines Crashtests einwirken, misst. Es muss den immer steigenden Anforderungen der Automobilindustrie gewachsen sein. Um die Belastungskriterien für den Frontalaufprall zu erhalten, wird



der explizit für diese Unfallkinematik in den 70er Jahren von General Motors entwickelte Frontalaufpralldummy Hybrid III 50 Perzentile verwendet.



Abbildung 16: Hybrid III 50 Perzentile Dummy [8]

50 Perzentile beschreibt, dass 50 % der männlichen Population kleiner sind als der Durchschnittswert der Häufigkeitsverteilung einer anthropometrischen Reihenuntersuchung [21, 24]. Der ATD hat ein Gewicht von 78 kg und eine Größe von 178 cm. Der für dreidimensionale Bewegungen entwickelte Dummy besitzt spezielle Sensoren, die Beschleunigungen und Kräfte an Kopf, Thorax und Becken messen. Die folgende Abbildung 16 zeigt die verschiedenen Dummies bzw. Prüfkörper für die jeweilige Anwendung zur Überprüfung der Fahrzeugsicherheit eines Automobils.

<b>Crash_Konstellation</b>	<b>Dummy</b>
Frontalcrash	Hybrid-III Familie
Heckcrash	EuroSID, EuroSID2, WorldSID
Heckcrash	BioRid
Fußgänger	POLAR
Kinder	P0, P3/4, P6, Q-Dummy

Tabelle 2: Messpuppen-Überblick: Dummies und ihre Einsatzgebiete [21]

## 2.5 Airbag

Heutzutage bilden pyrotechnische Gurtstraffer, Gurtkraftbegrenzer am Dreipunkt-Automatikgurt sowie der Airbag ein sorgfältig aufeinander abgestimmtes Insassen-Schutz-System.

Ein Airbag ist ein Sack aus Kunststoff. Die Aufgabe der Airbags besteht in der Minimierung des Verletzungsrisikos der Insassen bei unterschiedlichen Aufprallarten. Je nach Anprallrichtung des Fahrzeuges und der dabei auftretenden Fahrzeugverzögerung entfaltet ein Airbag seine volle Schutzwirkung. Nachdem der Airbagsack durch den Gasgenerator voll aufgeblasen wurde, baut er mithilfe von Luftaustrittslöchern – sogenannte Stants – die eingeströmten Gase und damit die Bewegungsenergie des Insassen ab. Durch die Kombination mit dem Gurtsystem wird z. B. bei Frontalairbags ein Anprall des Kopfes und der Brust gegen das Lenkrad, die Instrumententafel und die Windschutzscheibe verhindert [21, 25, 26].

### 2.5.1 Wirkungsweise des Airbags

Die Wirkungsweise von Airbag-Systemen ist gekennzeichnet durch das Zusammenspiel der Sensorik, der Auslöseelektronik, des Gasgenerators und des Luftsacks. Bei vielen Fahrzeugen erfolgt eine Meldung von den an der vorderen Stossstange befestigten Sensoren. Die Information im Steuergerät wird mit den fahrzeugspezifischen Sollwerten verglichen und bei einer Überschreitung der Grenzwerte ein Zündimpuls an das Airbagmodul übertragen [25].

Bei der Detektion eines insassengefährdenden Unfalls liegt die für die Auslösung eines Airbags notwendige Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta V$  oberhalb 20 km/h (abhängig von der Härte des Aufpralls auf ein Hindernis). Es erfolgt eine Zündung des Gasgenerators. Durch Abbrennen des pyrotechnischen Treibsatzes wird ein Gas freigesetzt, das den Luftsack entfaltet und füllt. Die Entfaltungszeit ist abhängig von Größe und der Funktion des Airbags. Erfolgt eine Zündung auf der Fahrerseite, betragen Zünd- und Füllzeit des Airbagmoduls zwischen 30 ms und 40 ms, auf der Beifahrerseite zwischen 40 ms und 50 ms. Das Volumen eines Fahrerairbags beträgt im Normalfall (in Europa) zwischen 35 und 60 Litern und auf der Beifahrerseite meist um die 120 Liter. Um Einsparungen am Gesamtfahrzeug zu realisieren, experimentieren die Airbaghersteller gerade auf der Beifahrerseite mit kleineren Luftsäcken (ca. 40 Liter). Da die Energie des Insassen aber ebenso wie mit dem 120-Liter-Luftsack abgebaut

werden muss, arbeiten die Airbaghersteller mit einem stärkeren Gasgenerator, der einen höheren Druck erzeugt, sodass die Deformierbarkeit des Luftsacks reduziert wird und damit die Aggressivität des Airbags zunimmt.

### 2.5.2 Aufprallkinematik und Entfaltung des Airbags

Erfolgt der Aufprall des Fahrzeuges frontal gegen eine starre Barriere, so steht das Fahrzeug bereits nach 50 Millisekunden. Die Objekte im Fahrzeug sowie der Insasse bewegen sich aber aufgrund ihrer Trägheit weiterhin nach vorne. Sie werden in ihrer Bewegung erst durch die Fahrzeugstrukturen bzw. die Insassen durch das Gurt-Airbag-System abgebremst. In Abbildung 17 ist der zeitliche Verlauf der Airbagauslösung für die Fahrer- und Beifahrerseite dargestellt. Der untere und der mittlere Körperbereich des Insassen werden durch das Dreipunkt-Gurtsystem zurückgehalten. Kopf und Oberkörper tauchen in den Airbag ein [26]. Durch Luftaustrittslöcher (Stants) im Luftsack, die sich auf der Hinterseite oben bzw. unten befinden, können die Gase des Airbags entweichen und so die Energie des Insassen abgebaut werden. Ungefähr 120 ms nach dem Aufprall ist die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuginsassen zur Karosserie abgebaut und die Luftsäcke fallen in sich zusammen.

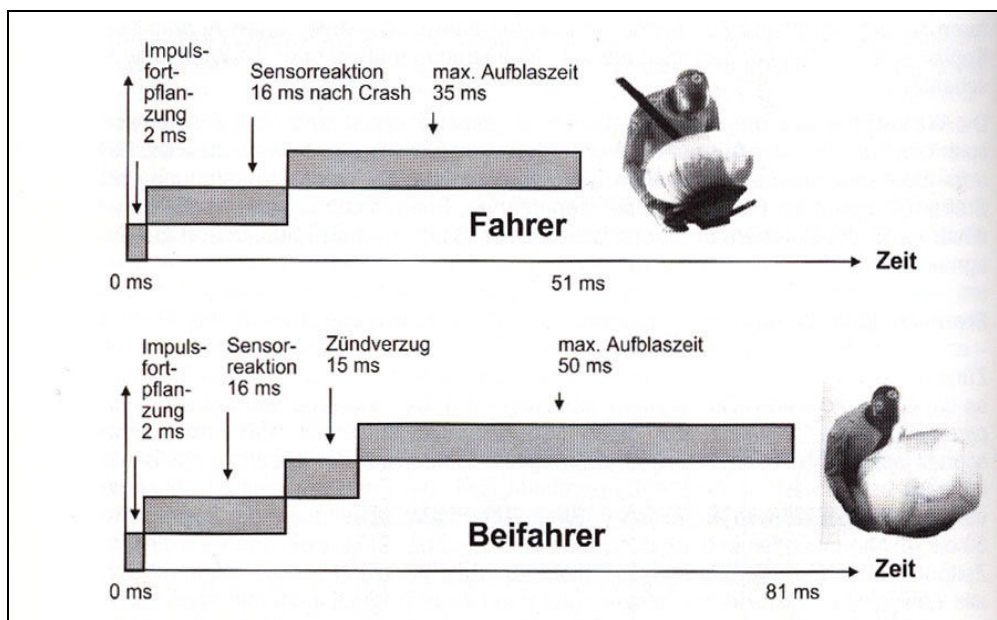


Abbildung 17: Zeitlicher Ablauf der Airbagauslösung für Fahrer und Beifahrer [26]

Brookes et al. haben die Kraftentwicklung eines Airbags im kompletten Entfaltungsvorgang untersucht [27]. Sie zeigen auf, dass der Airbag während der Entfaltungs- bzw. Füllungsphase die größte Kraftentwicklung hat.

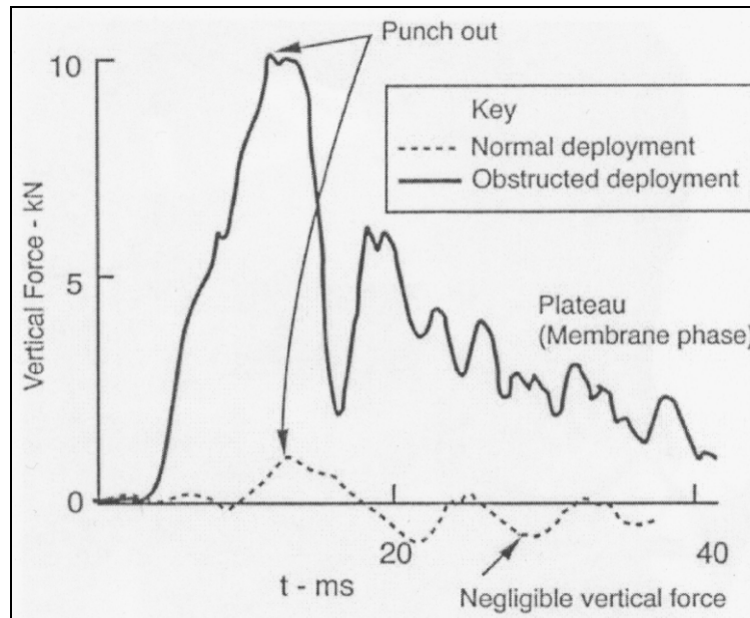


Abbildung 18: Kraftentwicklung beim Airbag [27]

Die gestrichelte Linie im Diagramm beschreibt die Kraftentwicklung des Airbags beim Entfaltungsvorgang ohne Gegenstand in der Ausbreitungsbahn. Der maximale Wert liegt bei ca. 1 kN bei einer Zeit von 15 ms nach Auslösung des Airbags.

Die schwarze Kennlinie beschreibt die Kraftentwicklung während der Entfaltung des Airbags mit einem Gegenstand in seiner Ausbreitungsbahn. Der Airbag entwickelt eine Kraft bis an die 10 kN. Befindet sich der Kopf des Insassen während des Entfaltungsvorgangs des Airbagmoduls also in dessen Ausbreitungsbahn, muss mit einer höheren Krafteinwirkung auf seinen Kopfbereich gerechnet werden, als wenn der Airbag bereits komplett entfaltet wäre. Demnach ist das Potenzial, Verletzungen im Gesichtsbereich zu erleiden, größer, wenn sich der Insasse in der Entfaltungsbahn des Airbags befindet. In Crashlabors werden in der Regel einphasige Aufprallversuche gegen eine Barriere gefahren, sodass hier der Zeitraum optimal abgestimmt ist. Im realen Unfallgeschehen kann es jedoch zu einer unphysiologischen Sitzposition (z. B. nach vorne gebeugt) sowie zu mehrphasigen Kollisionen und verzögerter Sensorreaktion kommen, sodass der Kopf dann in eine deutlich stärkere Airbageinfaltungsphase eintauchen kann.

### 3 Material und Methoden

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben lauten die Ziele der Arbeit wie folgt:

- Untersuchung der Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagentfaltung,
- Ermittlung von Brillen bzw. Brillenmaterialien, die tendenziell die höchste Bruchgefahr bei einer Airbagentfaltung haben,
- Ermittlung der Laborversuchsparameter für Pkw-Frontalaufprall mit Airbagentfaltung und Generierung eines Beschleunigungskorridors,
- Entwicklung einer experimentellen Komponentenmethode,
- Übertragbarkeit (Validierung) der experimentellen Komponentenmethode,
- Differenzierung von Brillengestellen und Linsenmaterialien.

Abbildung 19 zeigt die grundsätzliche Vorgehensweise anhand eines Flussdiagramms.

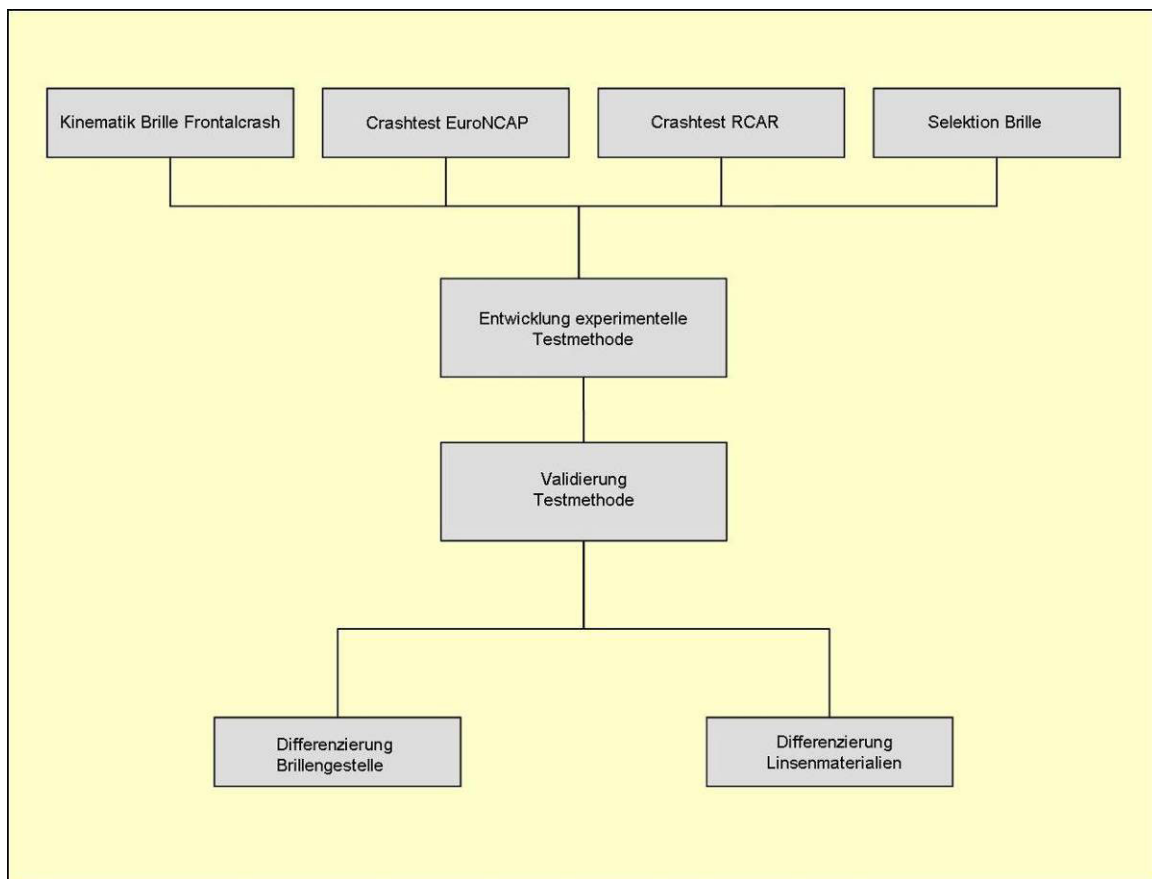


Abbildung 19: Vorgehensweise, Darstellung Flussdiagramm

Im ersten Schritt der Arbeit soll die Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall untersucht werden. Existierende Hypothesen nehmen an, dass die Brille aufgrund ihrer unterschiedlichen Trägheitsmomente gegenüber dem Kopf frühzeitig vor dem Auftreffen auf den Airbag vom Insassen getrennt wird und dadurch kein Verletzungspotenzial für die Fahrzeuginsassen darstellt. Des Weiteren gibt es bereits eine Untersuchung zu dieser Thematik [3]. Dort wird postuliert, dass sich die Brille frühzeitig vom Fahrzeuginsassen trennt. Allerdings wurde dieser Versuch nur einmal und mit einer Sonnenbrille durchgeführt. Deshalb wurden für die Zwecke der vorliegenden Arbeit verschiedene Pkw-Frontalaufprallversuche mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt und dabei die Kinematik der Brille genauer betrachtet.

Im zweiten Teil der Arbeit werden Brillengestelle und Brillenmaterialien in Vorversuchen mit einem vereinfachten Versuchsaufbau auf ihre Bruchfestigkeit untersucht, die für die Thematik Airbag-Kopfverletzungen von Bedeutung ist. Dabei werden randlose, Tragrand- und Vollrand-Brillenmodelle verwendet, die laut Zentralverband der deutschen Augenoptiker (ZVA) in der deutschen Population häufig vertreten sind [29]. Die Ergebnisse dieser Vorversuche werden dann später auf der entwickelten experimentellen Komponentenmethode überprüft.

Des Weiteren wird ein Brillenmodell, das sich in den Vorversuchen als bruchfreudig herausgestellt hat, in realen Crashversuchen verwendet, um die Randbedingungen zu generieren, die auf die experimentelle Komponentenmethode übertragen werden sollen.

Im dritten Teil werden Beschleunigungsparameter, die der Insasse bei einem Frontalaufprall erfährt, in diversen Crashversuchen aufgenommen.

Dabei bilden EuroNCAP-Frontalaufprallversuche (64 km/h) die Obergrenze der Insassenbelastung und RCAR-Frontalaufprallversuche (22 km/h) die Untergrenze. Die dabei aufgenommenen Beschleunigungsparameter werden in ein Diagramm übertragen und ein Beschleunigungskorridor des Kopfes beim Eintauchvorgang in den Airbag generiert. Die Verzögerungskurven der zu entwickelnden experimentellen Komponentenmethode müssen sich innerhalb dieses Korridors befinden, damit die Methode ein valides und aussagekräftiges Ergebnis liefern kann.

Im Hauptteil dieser Arbeit werden die gewonnenen Beschleunigungsparameter des Dummys aus den realen Pkw-Frontalaufprallversuchen auf eine experimentelle Labormethode übertragen.

Im letzten Abschnitt der Arbeit werden die Modelle aus dem zweiten Teil (Vorversuche) unter realistischen Bedingungen, die auch bei einem Pkw-Frontaufprall auftreten, untersucht – zum einen zur Bestätigung und Etablierung der entwickelten Methode und zum anderen, damit eine Aussage getroffen werden kann, welche Brillen die tendenziell größte Gefahr für den Insassen darstellen, eine Verletzung im Gesichts- und dabei speziell im Augenbereich zu erleiden.

### **3.1 Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbag-auslösung**

Jährlich werden durch die AXA Winterthur und Dekra in Wildhaus (Schweiz) für die Öffentlichkeit zugängliche Crashtests durchgeführt. Im diesem Rahmen wurde einem Hybrid-III-Frontalaufpralldummy eine Brille aufgesetzt. Weitere Versuche wurden zeitnah in verschiedenen Crashinstitutionen durchgeführt.

Der Autositz, auf dem der Dummy positioniert worden ist, wurde in die letzte mögliche Rasterverstellung des Sitzes gebracht. Durch diese Maßnahme und durch die im Aufprall bedingte Aktivierung des Gurtsystems wird gewährleistet, dass der Dummykopf nicht in den Airbag eindringen konnte. Dadurch lassen sich der Bewegungsablauf des Dummykopfes und die Kinematik der Brille sehr gut im Highspeedvideofilm nachvollziehen.

Damit immer gleiche Versuchsbedingungen bzw. eine gleiche Positionierung der Brillen gewährleistet werden konnte, wurde die Brille gemäß Abbildung 26 positioniert und im Anschluss mit Klebeband befestigt. Arbeiten am Fahrzeug und am Dummykopf konnten damit die genaue Sitzposition der Brille nicht mehr beeinflussen. Kurz vor dem Versuch wurde das Klebeband wieder entfernt. Durch diese Maßnahme wurde eine gute Reproduzierbarkeit innerhalb aller Versuche zur Kinematik des Insassen und der Brille erreicht.



Abbildung 20: Positionierung Brille am HIII-Dummykopf

Die Fahrzeuge wurden aus dem Stand mittels Seilzugs auf Geschwindigkeiten von jeweils 20 km/h, 64 km/h und 70 km/h beschleunigt und frontal mit 100 Prozent Überdeckung auf ein stehendes Hindernis geführt.

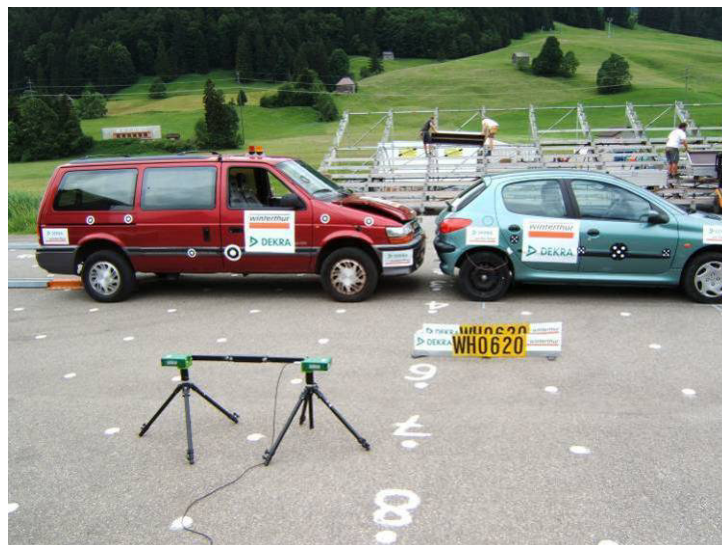


Abbildung 21: Crashtest Wildhaus



### **3.2 Ermittlung bruchgefährdeter Brillenfassungen und Linsenmaterialien**

Die Ermittlung bruchgefährdeter Brillenfassungen und Linsenmaterialien wurden in drei Versuchsteile gegliedert.

In der ersten Versuchsreihe wurden die Bruchneigungen der verschiedenen Gläser in Kombination mit unterschiedlichen Fassungsarten untersucht.

In der zweiten Versuchsreihe stand die Fassungsart bzw. das Brillengestell im Fokus. Hierbei wurde der Schwerpunkt auf verschiedene Fassungsmodelle der gleichen Fassungsart gelegt, die sich nur in Form und Material unterschieden. Zwischen den Linsenmaterialien bestand kein Unterschied. Unterscheidungskriterium für diesen Versuch waren die Befestigung der Gläser und die verschiedenen Fassungen. Dabei stellte sich die Frage, inwieweit sich diese Befestigungsvarianten, die Form der Fassung und die Materialien auf die Bruchneigung auswirken und welches Bruchmuster der jeweiligen Fassung zugrunde liegt.

In der dritten Versuchsreihe dienten die Ergebnisse aus den beiden vorangegangenen Versuchsreihen als Ausgangspunkt. Hier wurde der Fokus auf die Differenzierung der Glasart in Kombination mit der bruchgefährdetsten Fassung gelegt. Es wurden alle Glasarten mit der gleichen Fassung hinsichtlich ihrer Unterschiede im Bruchverhalten untersucht.

#### **3.2.1 Versuchsaufbau**

Für die Durchführung der Versuche wurde das Biomechaniklabor der Bundeswehruniversität Neubiberg in München genutzt. In der zur Verfügung stehenden sechs Meter hohen Halle bot sich die Möglichkeit, ein großes physikalisches Pendel aufzubauen, an dem ein Dummykopf befestigt war. Dieser Versuchsaufbau simulierte den Eintauchvorgang des Kopfes beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung. Die Übertragbarkeit des Pkw-Frontalaufpralls auf die Pendelmethode wird in Kapitel 3.4.1 beschrieben. Das Pendel hat eine Länge von 5 m. Dabei wurde der Dummykopf mithilfe von zwei Stahlseilen an der Stahlverankerung an der Decke befestigt. Um eine Rotation des Kopfes zu vermeiden, wurden die Befestigungspunkte in einen Abstand von 3 m zueinander gelegt und die Stahlseile daran befestigt (Abbildung 22).

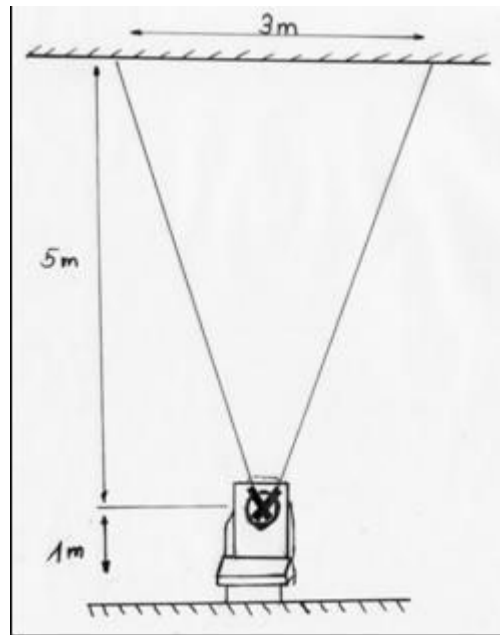


Abbildung 22: Skizze Versuchsaufbau Pendelanlage zur Ermittlung der Bruchfestigkeit von Brillen- und Linsenmaterialien

Die Befestigung der Seile erfolgte am Hybrid-III-Dummykopf rechts und links an der Rückseite des Kopfes, an dem zwei Metallplatten als Halterung angebracht wurden (Abbildung 23).

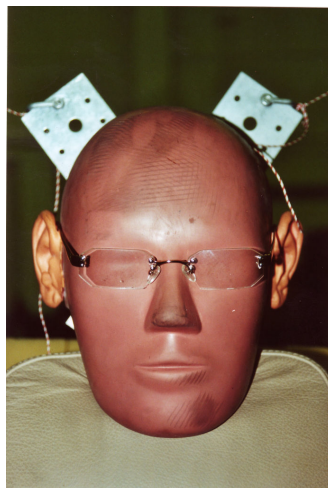


Abbildung 23: Aufhängung HIII-Dummy

Betrachtet man einen Pkw-Frontalaufprall unter realen Versuchsbedingungen, so kann man aus dem Hochgeschwindigkeitsfilm ermessen, dass der Eintauchwinkel des Kopfes in den Airbag bei einem 45-Liter-Standard-Fahrerairbag ca.  $68^\circ$  gegenüber der Horizontalen der Fahrzeuglängsachse beträgt. Dieser Eintauchwinkel, ist mit kleinen Abweichungen ( $< 2^\circ$ ) bei allen durchgeführten Frontalaufprallversuchen

annähernd gleich gewesen. Die Aufhängung des Hybrid-III-Dummykopfes wurde realen Pkw-Frontalaufprallversuchen angepasst. Damit entspricht der Eintauchwinkel des Dummypendelkopfes (Abbildung 25) dem realen Eintauchwinkel des Dummys in den Airbag (Abbildung 24).

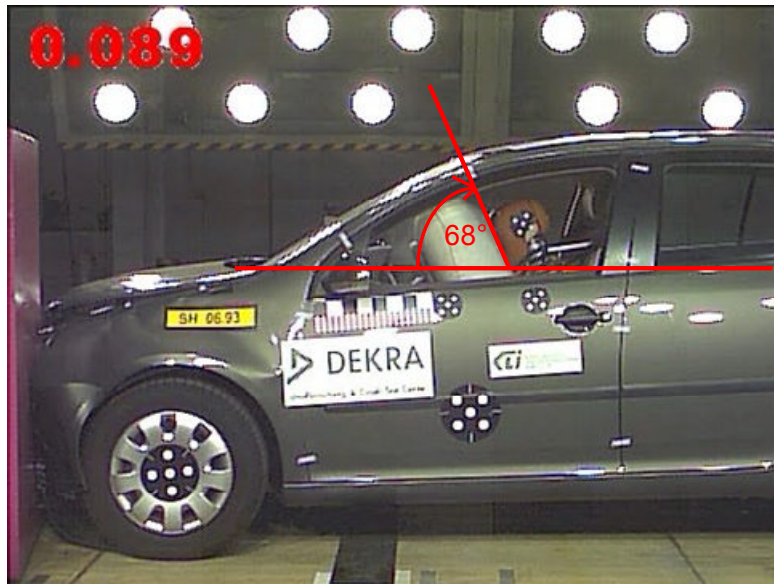


Abbildung 24: Eintauchwinkel Kopf/Airbag

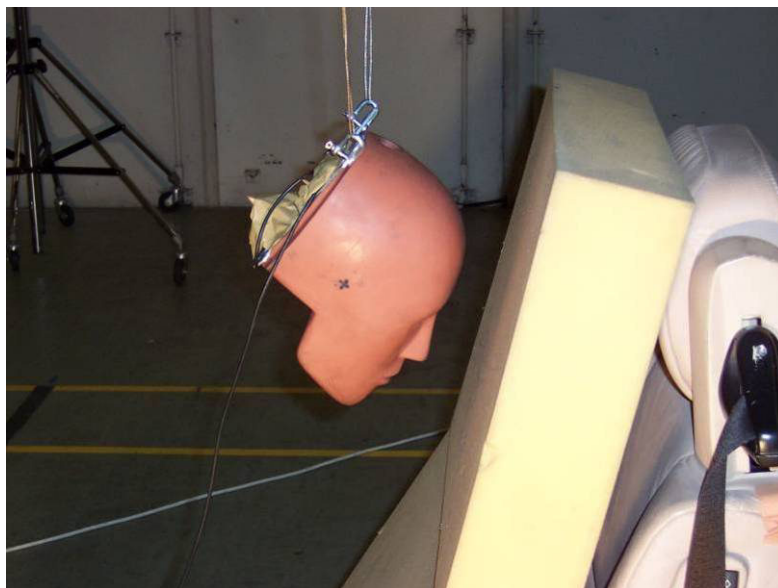


Abbildung 25: Eintauchwinkel Kopf in Schaumstoffmatte

Für den Hybrid-III-Kopf wurden Ohrmuscheln aus Silikon nachgebildet. Der Dummykopf wurde von einem Anthropologen vermessen und die Ohren in der Frankfurter Ebene (Frankfurt Plane) positioniert (Abbildung 26). Damit wurde gewährleistet, dass die Brille anatomisch genau sitzt und jeder Versuch reproduzierbar ist.

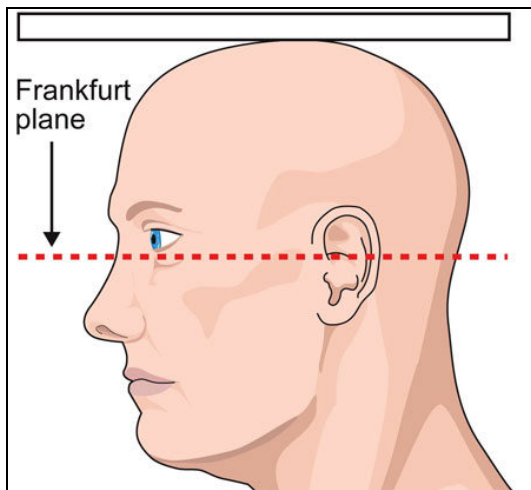


Abbildung 26: Frankfurter Ebene [40]



Abbildung 27: Hybrid-III-Dummykopf mit Ohren

In der Automobilzuliefererindustrie werden in der frühen Entwicklungsphase von Airbagmodulen Schaumstoffmatten als Airbagsersatz eingesetzt. Entsprechend wurden zwei hintereinander gestellte Schaumstoffmatten (Stauchhärte 40<sup>2</sup>) mit einer Gesamtdicke von 22,4 cm verwendet.

Vergleichsmessungen im Vorfeld der Versuche zwischen dem hier verwendeten Schaumstoff und einem Fahrerairbagmodul ergaben ähnliche Kopfverzögerungen beim Eintauchvorgang in das jeweilige Medium. Die Eintauchgeschwindigkeit des Dummykopfes in den Airbag lag bei 23,5 km/h, die des Dummykopfes in die Schaumstoffmatten bei 24 km/h. Abbildung 28 zeigt den zeitlichen Verlauf der Kopfbeschleunigung des Dummykopfes beim Eintauchvorgang in den Airbag bzw. in den Schaumstoff.

<sup>2</sup> Die Festigkeit wird als Stauchhärte angegeben, z. B. Stauchhärte 40 = 4kPa bei 40 % zusammen-drücken, also die Kraft des Gegendrucks.

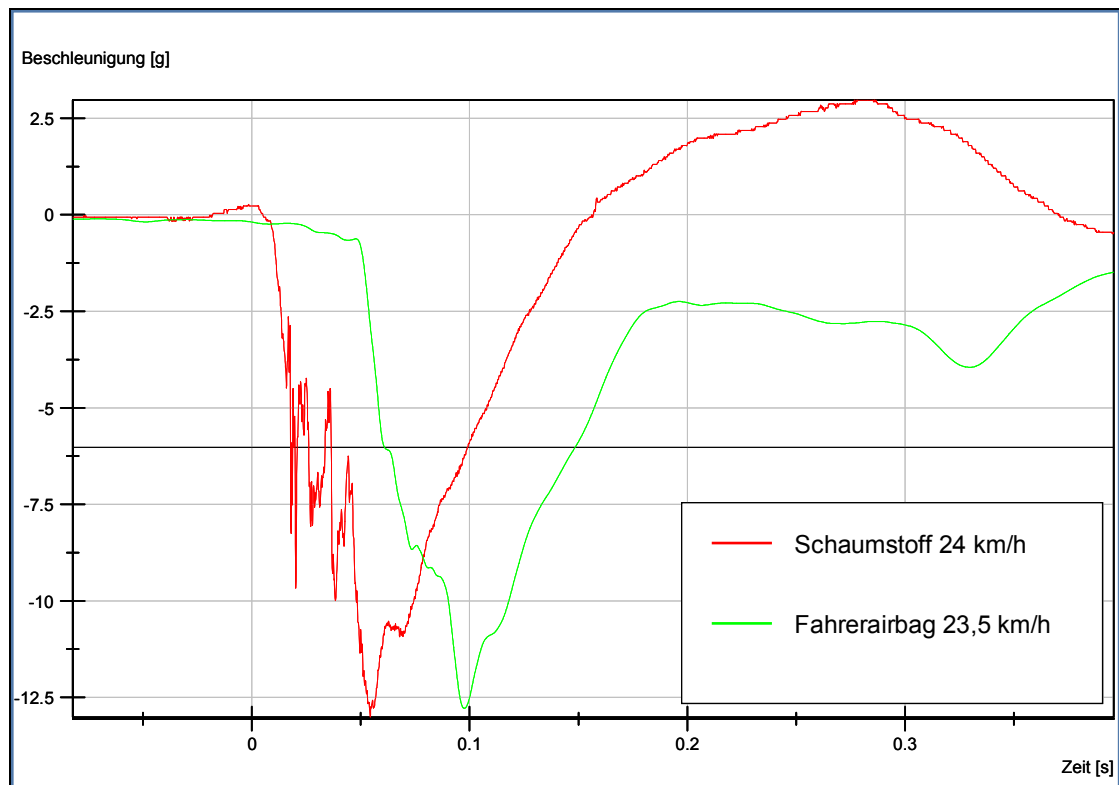


Abbildung 28: Vergleich Kopfverzögerung Schaumstoff vs. Airbag

Der im Kopfschwerpunkt des Dummys installierte Sensor der Firma Interface (Modellnr. SSM-AF-10KN) maß drei axiale Kopfbeschleunigungen während der Versuche. Ein Datenlogger nahm mit einer Frequenz von 50 kHz die von den Sensoren gemessenen Daten auf, die anschließend nach SAE J211 [23] gefiltert, geglättet und mit Diadem 11.0 der Firma National Instruments weiterverarbeitet wurden.

Eine Highspeedkamera nahm alle Versuche mit einer Frequenz von 1000 Hz auf. Mithilfe des Bildbearbeitungsprogramms Falcon Extra 7 wurden die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bearbeitet.

### 3.2.2 Erste Versuchsserie, Differenzierung von Brillentypen

Im ersten Versuchsteil wurde untersucht, welcher Fassungsyp und welche Glasart das höchste Risiko für einen Bruch mit sich bringen. 15 Brillen wurden einem Pendelversuch unterzogen, um eine erste Differenzierung der Brillenfassungen und Linsematerialien zu erhalten. Die ersten fünf Versuche wurden mit identischen Tragrandfassungen durchgeführt (Abbildung 29).



Abbildung 29: Brille, Versuche 1 bis 5

Der Brechungsindex stieg pro Versuchsbrille an (1,5, 1,6, 1,67, 1,74). Auf der rechten Seite wurden Linsen mit einer dioptrischen Minuswirkung verwendet, auf der linken Seite Linsen mit einer dioptrischen Pluswirkung.

Bei den Versuchen 6 bis 10 wurden ausschließlich Brillen mit einer Vollrandfassung untersucht (Abbildung 30). Die beiden Gläser unterschieden sich wie bei den Versuchen 1 bis 5 durch dioptrische Minus- bzw. Pluswirkung.



Abbildung 30: Vollrandbrille, Versuche 6 bis 10



Die Versuche 11 bis 15 wurden mit randlosen Brillenmodellen durchgeführt. Auch hier stieg der Brechungsindex von geringbrechend zu hochbrechend an. Der Fokus bei randlosen Modellen lag bei den Verbindungsstellen bzw. Verschraubungen zwischen Linse und Fassung. Bei Brille 12 bis 15 wurden die Verschraubungen auf zwei je Glas beschränkt (Abbildung 32), d. h., eine Linse besitzt zwei Bohrungen zur Befestigung des Steges bzw. der Fassung. Zum Vergleich wurde bei Brille 11 ein Glas mit vier Verbindungsstellen verwendet (Abbildung 31). Steg und Fassung wurden mit jeweils zwei Bohrungen versehen.

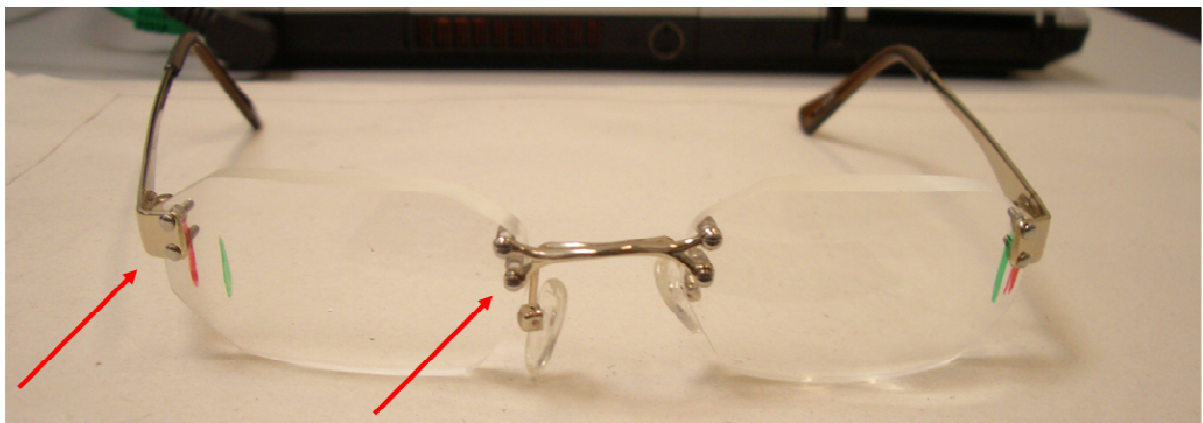


Abbildung 31: Versuch 11, je vier Verschraubungen pro Glas

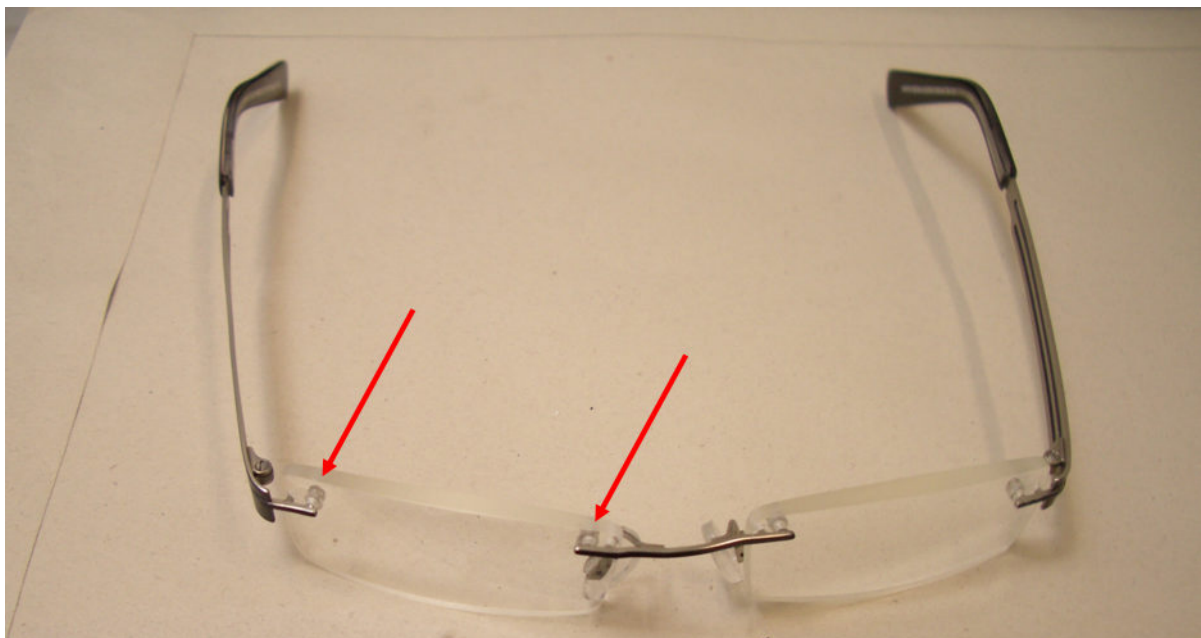


Abbildung 32: Versuche 12 bis 15, je zwei Verschraubungen pro Glas

Jede Fassung wurde der Reihenfolge nach einem Pendelversuch unterzogen und jeweils nur für einen Versuch verwendet. Auf eine Auswahl der Bohrlochdicken

(Durchmesser der Bohrungen) wurde verzichtet. Primär sei nochmals erwähnt, dass diese Versuchserie für eine Vorselektion der Brillen und Glasmaterialien genutzt wurde, um für die dann folgenden zwei Versuchsserien den tendenziell bruchgefährdetsten Brillentyp zu definieren.

Fassung	Fassungsart	Brechungsindex der Gläser(n)	Dioptrische Wirkung rechtes Glas (dpt)	Dioptrische Wirkung rechtes Glas (dpt)
1	Tragrand	1,5	-3,25	3,25
2	Tragrand	1,6	-2,75	2,75
3	Tragrand	1,67	-1,75	1,75
4	Tragrand	1,74	-2,5	2,5
5	Tragrand	1,5	-2	2
6	Vollrand	1,5	-3,25	3,25
7	Vollrand	1,6	-2,75	2,75
8	Vollrand	1,67	-1,75	1,75
9	Vollrand	1,74	-2,5	2,5
10	Vollrand	1,5	-2	2
11	randlos	1,5	-3,25	3,25
12	randlos	1,6	-2,75	2,75
13	randlos	1,67	-1,75	1,75
14	randlos	1,74	-2,5	2,5
15	randlos	1,5	-2	2

Tabelle 3: Versuchsmatrix erste Versuchsserie

Der Fachbereich Augenoptik der Hochschule Jena, der auch die Brillen für die Versuche anfertigte, hat Spannungsmessungen zwischen Brillenglas und Vollrand-, Tragrandfassungen und randlosen Modellen durchgeführt [38]. Mittels Aufnahmen einer speziellen Kamera konnten Kräfte bzw. Spannungen dargestellt werden, die – bedingt durch das jeweilige Fassungsmodell – auf das Linsenmaterial im Normalzustand (vor dem Versuch) wirkten.



### 3.2.3 *Zweite Versuchserie, Differenzierung der Befestigung von Brillen- gläsern/Brillenfassungen*

Die zweite Versuchsserie baute auf der Vorselektion der ersten Versuchsserie auf, in der sich tendenziell gezeigt hatte (Kapitel 4.2.1), dass randlose Brillenmodelle die größte Bruchneigung aufweisen. In der zweiten Versuchsserie wurden daher vier verschiedene randlose Fassungsmodelle mit einer Standardverglasung im Plus- und Minusbereich getestet. Die Modelle unterschieden sich in der Brillenform, in ihrem Material und in der Befestigung der Gläser. Die Brillenform wurde variabel gewählt und speziell dem Dummykopf angepasst. Da die meisten Brillenfassungen aus Metall gefertigt werden, erschien hier eine Unterscheidung in der Befestigung der Gläser sinnvoll. Demnach wurden Fassungen mit verschiedenen Befestigungs- bzw. Bohrlochvarianten gewählt. Die Brillen sind mit zwei oder vier Bohrlöchern pro Glas gefertigt worden. Folgende Aspekte wurden innerhalb dieser zweiten Versuchsreihe betrachtet und entsprechende Fragen beantwortet:

- Bruch ja/nein,
- Bruchstellen pro Fassung, Anzahl der Bruchstücke bzw. Anzahl der Scherben,
- Lokalisation der Bruchstellen,
- Anzahl der gebrochenen Fassungen je Fassungsmodell,
- Unterschiede Plus-/Minusgläser.

#### 3.2.3.1 Fassungsmodell 1

Die erste Fassung für die zweite Versuchsserie bestand aus Metall. Die Befestigungsstellen der Gläser waren auf zwei Stück pro Glas begrenzt und die Befestigung erfolgte über jeweils zwei nah beieinander liegende (ca. 5 mm) Metallstifte. Die Kunststoffhülsen fixierten von der Innen-/Außenseite die Metallstifte. Bei dieser Brille handelte es sich um eine flexible Brille. Leichte Verbiegungen und Torsionen haben keinen Einfluss auf die Bruchfestigkeit solcher Brillen (Abbildung 33 und Abbildung 34).



Abbildung 33: Fassungsmodell 1

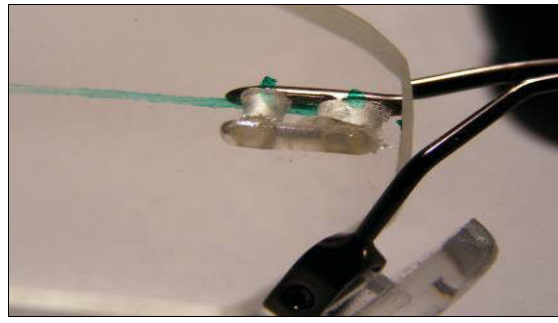


Abbildung 34: Zwei Bohrlöcher, eine Verschraubung, ein Stift

### 3.2.3.2 Fassungsmodell 2

Die zweite Fassung war mit Federscharnieren bestückt, wodurch mechanische Krafteinwirkungen oder Überdehnungen von diesem Brillenmodell bis zu einem gewissen Grad absorbiert werden können. Das Glas war an zwei Stellen befestigt, wobei jede Stelle mit zwei horizontal nebeneinander liegenden Bohrlöchern versehen war. Für Halt sorgte eine unflexible Verschraubung an der Außenseite des Glases, und für die nötige Stabilität ein Metallstift weiter innen im Glas, der nur zu Stützzwecken lose im Bohrloch steckte und nicht weiter verankert war (Abbildung 35 und Abbildung 36).



Abbildung 35: Fassungsmodell 2, zweite Testserie

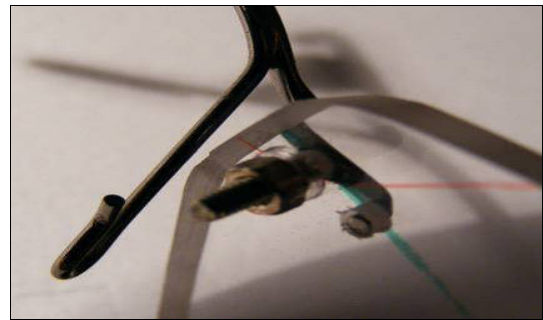


Abbildung 36: Horizontale Zweilochbohrung

### 3.2.3.3 Fassungsmodell 3

Die dritte randlose Brillenfassung war mit vier starren, senkrecht gearbeiteten Verschraubungen pro Glas versehen. Die Brille verfügte über keine vor mechanischen Einflüssen schützende Federung oder Flexibilität. Im Vergleich zu den anderen Brillenmodellen war sie das stabilste und starrste Brillenmodell innerhalb dieser zweiten Versuchsserie (Abbildung 37 und Abbildung 38).



Abbildung 37: Fassungsmodell 3, zweite Testserie

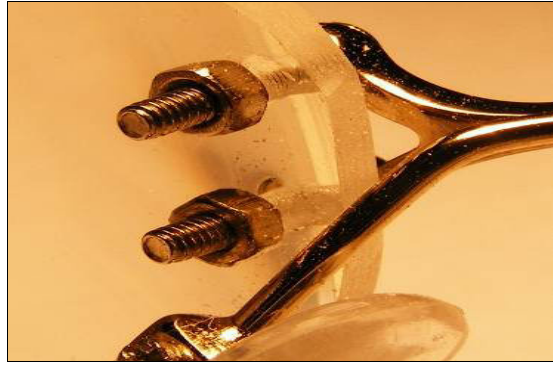


Abbildung 38: Senkrechte Vierlochbohrung

### 3.2.3.4 Fassungsmodell 4

Die vierte Brillenfassung hatte keine Energie aufnehmende Federwirkung an den Bügeln und besaß keine Flexibilität. Das Material des Mittelstegs war sehr steif gearbeitet. Die Befestigung der Gläser erfolgte horizontal an zwei Stellen der Fassung (Abbildung 39 und Abbildung 40). Die Art der Verbindung zwischen Glas und Fassung bzw. Mittelsteg unterschied sich kaum vom zweiten Versuchsmodell.

Ein Loch war starr verschraubt, in einem anderen, horizontal ca. 5 mm weiter temporal liegenden Loch befand sich ein Stift, der für zusätzlichen Halt sorgte. Die Reihenfolge von Verschraubung und Stift lief reziprok zum Fassungsmodell 2.



Abbildung 39: Fassungsmodell 4, zweite Testserie

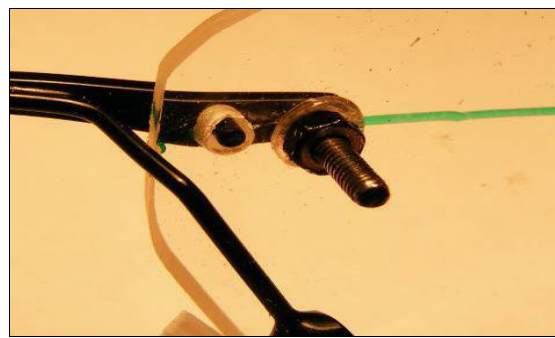


Abbildung 40: Zweilochbohrung

In der zweiten Testserie wurde jedes Brillenmodell achtmal getestet. Jedes der vier Fassungsmodelle wurde jeweils achtmal nach einem fest vorgegebenen Schema verglast. Bei allen Brillenmodellen wurde viermal mit Plusgläsern und viermal mit Minusgläsern gearbeitet.

Die Festlegung der Bohrlochdicken (Bohrlochdurchmesser) konnte bei zwei Befestigungspunkten pro Glas nur an einer Stelle pro Glas erfolgen. Legt man eine Stelle im Glas fest, die der geforderten Bohrlochdicke entspricht, und arbeitet die Glasform aus dem runden Rohglas, so kann die zweite Stelle in ihrer Dicke aufgrund der Geometrie und Stärke des Glases nicht mehr beeinflusst werden und variiert daher von Glas zu Glas.

Fassungsmodell	Fassung/ Versuch	Glaswirkung der Linsen	Bohrlochdicke rechte Glasseite (mm)	Bohrlochdicke linke Glasseite (mm)
1	16	Minus	2,5	2
	17	Minus	2	2,5
	18	Minus	2,5	2
	19	Minus	2	2,5
	20	Plus	2	2,5
	21	Plus	2,5	2
	22	Plus	2	2,5
	23	Plus	2,5	2
2	24	Minus	2,5	2
	25	Minus	2	2,5
	26	Minus	2,5	2
	27	Minus	2	2,5
	28	Plus	2	2,5
	29	Plus	2,5	2
	30	Plus	2	2,5
	31	Plus	2,5	2
3	32	Minus	2,5	2
	33	Minus	2	2,5
	34	Minus	2,5	2
	35	Minus	2	2,5
	36	Plus	2	2,5
	37	Plus	2,5	2
	38	Plus	2	2,5
	39	Plus	2,5	2
4	40	Minus	2,5	2
	41	Minus	2	2,5
	42	Minus	2,5	2
	43	Minus	2	2,5
	44	Plus	2	2,5
	45	Plus	2,5	2
	46	Plus	2	2,5
	47	Plus	2,5	2

Tabelle 4: Matrix des Verglasungsschemas für die zweite Versuchsserie

### 3.2.4 Dritte Versuchsserie, Differenzierung von Brillengläsern

Das Fassungsmodell, das sich in der zweiten Versuchsserie mit der höchsten Bruchanfälligkeit herausdifferenziert hatte, wurde in der dritten Versuchsserie mit allen

gängigen Glassorten in den verschiedenen Wirkungsbereichen (Plus-/Minuswirkung des Glases) getestet. Fünf verschiedene Glassorten wurden (Kapitel 2.3.2) einem Test unterzogen. Für jede Glassorte existierten acht Fassungen, jeweils vier Plus- und vier Minusgläser.

Brechungsindex	Fassung/ Versuch	Glaswirkung der Linsen	Bohrlochdicke rechte Glasseite (mm)	Bohrlochdicke linke Glasseite (mm)
1,5 (Standardglas)	48	Minus	2,5	2
	49	Minus	2	2,5
	50	Minus	2,5	2
	51	Minus	2	2,5
	52	Plus	2	2,5
	53	Plus	2,5	2
	54	Plus	2	2,5
	55	Plus	2,5	2
1,6 (mittelbrechend)	56	Minus	2,5	2
	57	Minus	2	2,5
	58	Minus	2,5	2
	59	Minus	2	2,5
	60	Plus	2	2,5
	61	Plus	2,5	2
	62	Plus	2	2,5
	63	Plus	2,5	2
1,57 (hochbrechend)	64	Minus	2,5	2
	65	Minus	2	2,5
	66	Minus	2,5	2
	67	Minus	2	2,5
	68	Plus	2	2,5
	69	Plus	2,5	2
	70	Plus	2	2,5
	71	Plus	2,5	2
1,74 (sehr hochbrechend)	72	Minus	2,5	2
	73	Minus	2	2,5
	74	Minus	2,5	2
	75	Minus	2	2,5
	76	Plus	2	2,5
	77	Plus	2,5	2
	78	Plus	2	2,5
	79	Plus	2,5	2
1,58 (Polycarbonat)	80	Minus	2,5	2
	81	Minus	2	2,5
	82	Minus	2,5	2
	83	Minus	2	2,5
	84	Plus	2	2,5
	85	Plus	2,5	2
	86	Plus	2	2,5
	87	Plus	2,5	2

Tabelle 5: Versuchsmatrix dritte Versuchsserie

Die Einteilung der Bohrlochdicken erfolgte analog zur zweiten Versuchsserie. Die Übersicht des Verglasungsschemas ist in Tabelle 5 dargestellt.

Die zu betrachtenden Aspekte gleichen der zweiten Versuchsserie:

- Bruch ja/nein,
- Bruchstellen pro Fassung, Anzahl der Scherben,
- Lokalisation der Bruchstellen,
- Anzahl der gebrochenen Fassungen je Glasart,
- Unterschiede Plus-/Minusgläser.

### 3.3 Ermittlung der Parameter für Pkw-Frontalaufprall und Generierung eines Beschleunigungskorridors

Für die Entwicklung und die Validierung einer experimentellen Testmethode ist es in der Crashthematik üblich, einen Korridor zu generieren. Dazu werden beispielsweise minimale und maximale Beschleunigungen aus Crashversuchen oder Komponentenversuchen ermittelt und in ein Zeit-Beschleunigungs-Diagramm übertragen. Aus den minimalen und maximalen Beschleunigungswerten aller Kurven wird dann der Beschleunigungskorridor generiert (Abbildung 41). Die durch eine experimentelle Testmethode erzeugte Beschleunigungskurve muss dann innerhalb dieses Korridors liegen, damit die Testmethode ein valides Ergebnis darstellt.

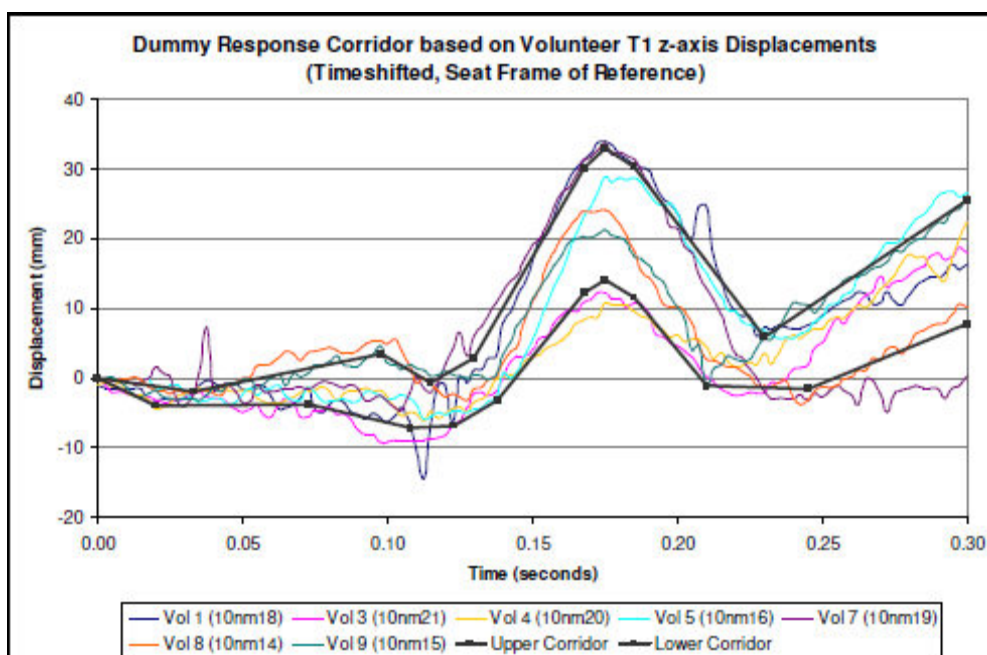


Abbildung 41: Beispiel eines Beschleunigungskorridors [30]

Für die Entwicklung der experimentellen Komponentenmethode im Rahmen dieser Arbeit wurden die erforderlichen Kopfverzögerungen beim Eintauchvorgang in den Airbag aus zwei Pkw-Frontalaufprallversuchen im ADAC Testzentrum in Landsberg am Lech und im Crashzentrum der Dekra in Neumünster ermittelt. Einem Hybrid-III-Dummy wurde dabei ein Brillenmodell aufgesetzt, das sich als besonders bruchgefährdet herausgestellt hatte (siehe Kapitel 4.2.4).

Ein Versuch wurde unter EuroNCAP-Testbedingungen durchgeführt [8, 31]. Er markiert die Obergrenze der Belastungswerte für den Insassen. Die Aufprallgeschwindigkeit für den Pkw betrug dabei 64 km/h gegen eine starre Barriere mit 40-Grad-Überdeckung. 40-Grad-Überdeckung heißt, dass 40 Prozent der Stossstange des Pkw auf die Barriere treffen und 60 Prozent daneben.

Die Untergrenze bildet ein Versuch unter RCAR-Testbedingungen [8, 32], wobei die Aufprallgeschwindigkeit 22 km/h bei einer Überdeckung von 40 Grad betrug. Bei dieser Kollisionsgeschwindigkeit wurde der Airbag gerade noch durch die Beschleunigungssensoren des Pkw ausgelöst.

Um einen plausiblen und aussagekräftigen Beschleunigungskorridor zu erhalten, wurden weitere Beschleunigungsdaten des Kopfes aus anderen Pkw-Frontalaufprallversuchen mit einbezogen. Die Aufprallgeschwindigkeiten variierten zwischen 20 km/h und 64 km/h. Abbildung 42 zeigt die verschiedenen ECE-Regularien, die zur Korridorgenerierung herangezogen wurden.

Vorschrift	Aufprallart	Kollisions- geschwindigkeit	Testbedingungen	Kommentar
R94	frontal	56 km/h	40 % Überdeckung	2 Hill-Dummys
R12	frontal	48..53 km/h	starre Wand	Deformation Fahrgastzelle
R33	frontal	48..53 km/h	starre Wand	Insassen- sicherheit
R12	frontal	24 km/h	Impaktor Test	Body Block Test

Abbildung 42: ECE-Frontalaufprallregeln [21]

Die Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsdaten beim Eintauchvorgang des Dummys in den Airbag wurden in ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm übertragen, mittels eines Auswertungstools der Firma National Instruments eine Hüllkurve erzeugt und der Korridor für die Entwicklung der experimentellen Testmethode generiert. Die Hüllkurve entspricht den minimalen und maximalen Verzögerungswerten aller Beschleunigungswerte des Kopfes beim Eintauchvorgang in den Airbag.



### 3.3.1 Korridorversuche (EuroNCAP, RCAR)

Versuchsaufbau und die -durchführung in den Crashanlagen des ADAC in Landsberg am Lech und der Dekra in Neumünster unterscheiden sich nicht voneinander. Aus diesem Grund wird hier nur der Versuchsaufbau der Dekra in Neumünster beschrieben (Abbildung 43).

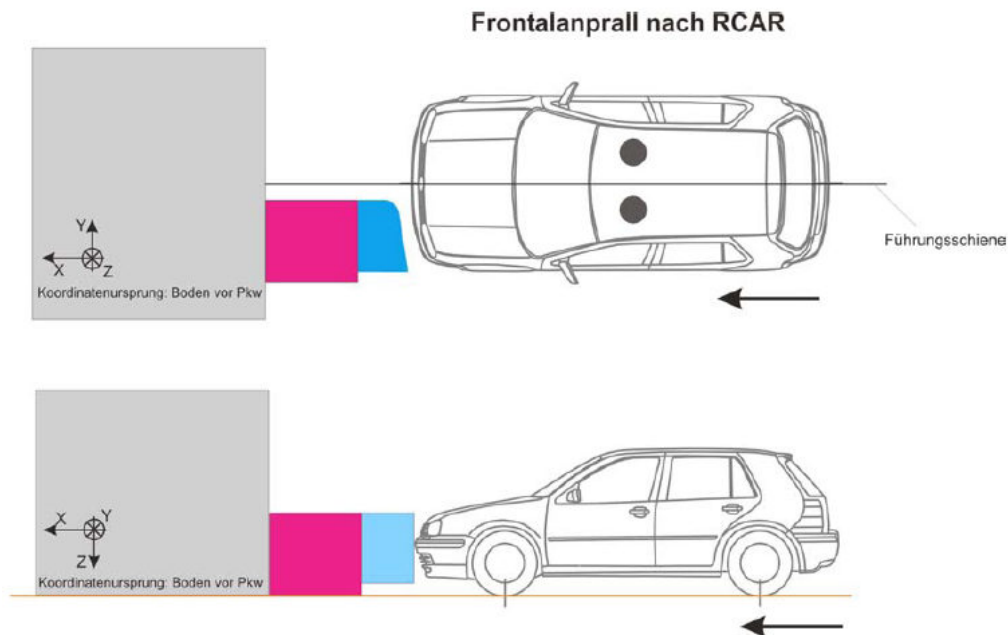


Abbildung 43: Versuchskonfiguration Frontalaufprallversuche

Das Fahrzeug wurde aus dem Stand mittels Anzugsseils schienengeführt auf seine Kollisionsgeschwindigkeit beschleunigt und kurz vor der Kollision abgetrennt. Äußere Einflüsse wie z. B. das Trägheitsmoment der Antriebsmotoren hatten keinen Einfluss auf das Fahrzeug, das mit 40 Prozent Überdeckung auf einen Stahlblock prallte. Durch einen an der vorderen Stossstange befestigten Trigger wurden die Sensoren des Dummys, die Highspeedkamera und weitere Aufnahmegeräte ausgelöst. Eine Speichereinheit nahm alle erforderlichen Daten während der Aufprallversuche auf. Anschließend wurden die gewonnenen Daten mit National Instruments Diadem 11.0 nach SAE J211 gefiltert [33] und entsprechend weiterverarbeitet.

Die Positionierung der Brille (Abbildung 20) erfolgte am Hybrid-III-Dummy durch einen Anthropologen, der die Ohren den anatomischen Gegebenheiten des Menschen angepasst und anschließend die Brille positioniert hat (Abbildung 44 und Abbildung 45).

Für spätere Auswertungen der Pkw-Aufprallversuche auf der Beifahrerseite wurde neben dem Fahrer auch der Beifahrer mit einer Brille ausgestattet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird jedoch nicht weiter darauf eingegangen.



Abbildung 44: HIII-Dummykopf mit angepassten Ohren und Brille



Abbildung 45: Fahrer, Beifahrer mit Brille

In Tabelle 6 ist die Versuchsmatrix für alle Pkw-Frontalaufprallversuche zur Korridorgenerierung der Kopfbeschleunigungen dargestellt.

Durchführungs- protokoll	Aufprall- geschwindigkeit	Überdeckung	Dummy-/Brillen- konfiguration
EuroNCAP	63km/h	40%	Zwei HIII-Dummys mit Brille
RCAR	20km/h	40%	HIII-Dummy mit Brille
EuroNCAP	63km/h	40%	ohne Brille, Korridorgenerierung
ECE-R12	58km/h	40%	ohne Brille, Korridorgenerierung
ECE-R12	60km/h	40%	ohne Brille, Korridorgenerierung
ECE-R33	20km/h	40%	ohne Brille, Korridorgenerierung
RCAR	20km/h	40%	ohne Brille, Korridorgenerierung

Tabelle 6: Versuchsmatrix Korridorgenerierung

### **3.4 Entwicklung und Validierung einer experimentellen Komponentenmethode zur Überprüfung von Brillen und ihrer Materialien beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung**

Wie bereits in Kapitel 1.2 dargestellt besteht die Hauptaufgabe dieser Arbeit in der Entwicklung einer experimentellen Komponentenmethode auf Basis eines Pkw-Frontalaufpralls. Folgende Anforderungen an die Labormethode müssen dabei berücksichtigt und in den Versuchsaufbau eingearbeitet werden:

- Einhaltung der Testvorschriften in Anlehnung an EuroNCAP und RCAR, d. h., Dummy, Versuchsablauf und die Bearbeitung der gewonnen Versuchsdaten etc. müssen den vorgegebenen Regularien entsprechen [31, 32, 33].
- Gewichtsbeschränkungen des Prüfkörpers nach Body Block ECE-R12. Das Gesamtgewicht des Prüfkörpers in der experimentellen Komponentenmethode beim Eintauchvorgang muss 35 kg betragen.
- Anatomische Gegebenheiten des Prüfkörpers nach DIN 44302. Der Kopf des Prüfkörpers muss 50 Prozent des Kopfes eines Mannes entsprechen.

Im ersten Teil dieses Kapitels wurde die Übertragbarkeit eines Pkw-Frontalaufprallversuchs auf ein physikalisches Modell dargestellt und beschrieben. Auf Basis dieser Überlegungen wurde unter Berücksichtigung der vorgegebenen Regularien eine Versuchsanlage geplant und aufgebaut sowie anschließend validiert, wozu der – wie in Kapitel 3.3 beschrieben – entwickelte Beschleunigungskorridor herangezogen wurde. Die aus der entwickelten experimentellen Labormethode gewonnenen Beschleunigungsdaten wurden in den generierten Beschleunigungskorridor aus Kapitel 4.3.3 übertragen. Lagen die Beschleunigungskurven vom Verlauf und die Höhe der Minimal- und Maximalwerte innerhalb dieses Korridors, wurde die Anlage als valide eingestuft und konnte für weitere Versuche herangezogen werden.

Zuletzt wurden die Brillen und ihre Materialien, die sich in den Vorversuchen als tendenziell bruchgefährdet herausgestellt hatten, auf der Anlage getestet – zum einen, um die Validierung der Methode zu überprüfen, und zum anderen, um die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.4 zu testen und zu manifestieren.

### 3.4.1 Übertragbarkeit auf ein physikalisches Modell

Unmittelbar vor und zum Kollisionszeitpunkt  $t_0$  ist die Geschwindigkeit des Fahrzeuges

$$V_{\text{Fahrzeug}} = \frac{s}{t} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

(wobei  $s$  = Weg [m],  $t$  = Zeit [s])

Der Dummy, der auf dem Fahrer- bzw. Beifahrersitz positioniert ist, hat die gleiche Anfahrtsgeschwindigkeit wie das Fahrzeug. Er muss vor der Kollision als Teil des Fahrzeugs und ab dem Kollisionszeitpunkt  $t_0$  entkoppelt betrachtet werden.

$$V_{\text{Dummy}} = V_{\text{Fahrzeug}}$$

Die Trajektorie der Geschwindigkeit wird in ihre drei Richtungskomponenten  $x$ ,  $y$  und  $z$  aufgeteilt und ist, wie Abbildung 46 verdeutlicht, nach SAE J211 [33] definiert. Die Fahrzeuglängsachse entspricht der  $x$ -Richtung, die  $z$ -Achse steht orthogonal dazu und die  $y$ -Achse entspricht der seitlichen Auslenkung bzw. der Transversalachse.

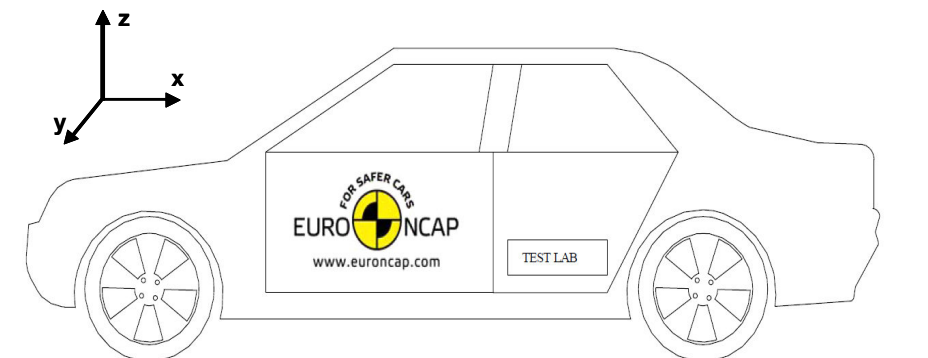


Abbildung 46: Definition Achsen Euro NCAP, RCAR

Die Geschwindigkeitskomponente des Fahrzeuges ist wie folgt definiert:

$$V_{\text{Fahrzeug}} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

Da unmittelbar vor dem Kollisionszeitpunkt nur die longitudinale Beschleunigung, also die x-Komponente, von Bedeutung ist, können y- und z-Komponente als Null angenommen werden.

$$V_{\text{Fahrzeug}} = \sqrt{x^2 + 0 + 0}$$

Demnach

$$V_{\text{Dummy}} = \sqrt{x^2 + 0 + 0}$$

Es muss ein Modell gefunden werden, das unmittelbar vor der Kollision bzw. zum Kollisionszeitpunkt  $t_0$  nur die x-Komponente der Geschwindigkeit, also die longitudinale Geschwindigkeitskomponente wiedergibt.

Als Modell bietet sich das physikalische Pendel an (Abbildung 47). Über die Auslenkung des Pendels kann die Pendelmasse auf die erforderliche Geschwindigkeit gebracht werden. Im Nulldurchgang des Pendels wirkt nur die x-Komponente und keine weiteren Beschleunigungen treten zu diesem Zeitpunkt auf. Hier muss die Kollision mit dem Airbag erfolgen.

Mit

$$E_{\text{kinetische Energie}} = E_{\text{potentielle Energie}}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh$$

(wobei  $m$  = Masse [kg],  $v$  = Geschwindigkeit [km/h],  $g$  = Erdbeschleunigung [ $\frac{m}{s^2}$ ],  $h$  = Höhe [m] entspricht). Die Geschwindigkeit des Pendels im Nulldurchgang ist damit:

$$v = \sqrt{2gh}$$

Nochmals wichtig zu erwähnen ist, dass ein physikalisches Pendel als Komponentenversuch für einen Pkw-Frontalaufprallversuch herangezogen werden kann – allerdings nur der Nulldurchgang des Pendels als Abbild der Aufprallsituation des Pkws gesehen werden darf.

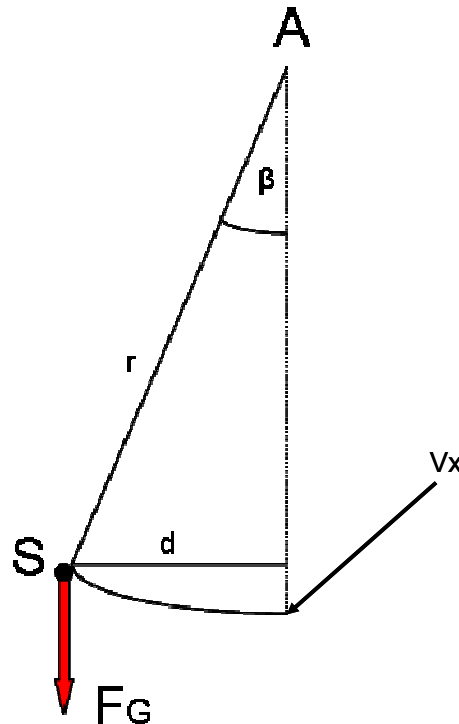


Abbildung 47: Physikalisches Pendel mit starrer Aufhängung

### 3.4.2 Eintauchwinkel Kopf

Mit dem Eintauchwinkel wird der Winkel zwischen Kopf-x- und Kopf-z-Achse bezeichnet. Betrachtet man den Eintauchwinkel des Kopfes in den Airbag beim Pkw-Frontalaufprall, zeigt sich, dass er parallel zur Oberfläche des Airbags eintaucht. Beim Pkw-Frontalaufprall vollzieht der Kopf aufgrund der Anbindung durch den Hals an den Körper eine Rotationsbewegung um die y-Achse. Die Rotationsbewegung des Insassen wird durch das Rückhaltesystem im Fahrzeug verursacht. Der Kopf neigt nach dem 1. Newton-Axiom dazu, seine Bewegung weiter nachzuvollziehen, wird aber durch die Anbindung des Halses an den abgebremsten Oberkörper auf eine Kreisbahn gezwungen.

Für den außenstehenden Betrachter taucht der Kopf von oben in den Airbag ein. Prinzipiell vollzieht er auch eine solche Bewegung. Betrachtet man den Vorgang aber genauer, treffen durch den Einbauwinkel des Airbagmoduls in das Fahrzeug bzw. durch den Lenkwinkel sowie wegen der durch das Gurtsystem eingeleiteten Rotation des Kopfes Kopf und entfaltete Oberfläche des Airbags immer parallel aufeinander. Für die Interaktion zwischen Gesicht, Brille und Airbag ist es nicht von Bedeutung, ob die Kopf-Airbag-Interaktion von oben oder unten erfolgt, sondern dass der Kopf immer parallel zur Oberfläche des Airbags eintaucht.



Abbildung 48: Eintauchvorgang Pkw-Frontalaufprall

In der zu entwickelnden experimentellen Komponentenmethode wurde das Airbagmodul so ausgerichtet, dass der Kopf genau im Nulldurchgang des Pendels in den Airbag eintaucht.

### 3.4.3 Versuchsaufbau

Für den Aufbau der Anlage wurde vom ADAC ein Versuchsraum im Testzentrum in Landsberg am Lech zur Verfügung gestellt. Das Labor besitzt eine Grundfläche von ca. 100 m<sup>2</sup> bei einer Raumhöhe von etwa 5 m. In der Mitte des Versuchsraums befinden sich ab einer Höhe von 2,70 m zwei parallel zueinander verlaufende T-Stahlträger (Abbildung 49), die über ausreichende Stabilität und geringe Torsion verfügen, um die Aufhängung des Pendels zu realisieren.



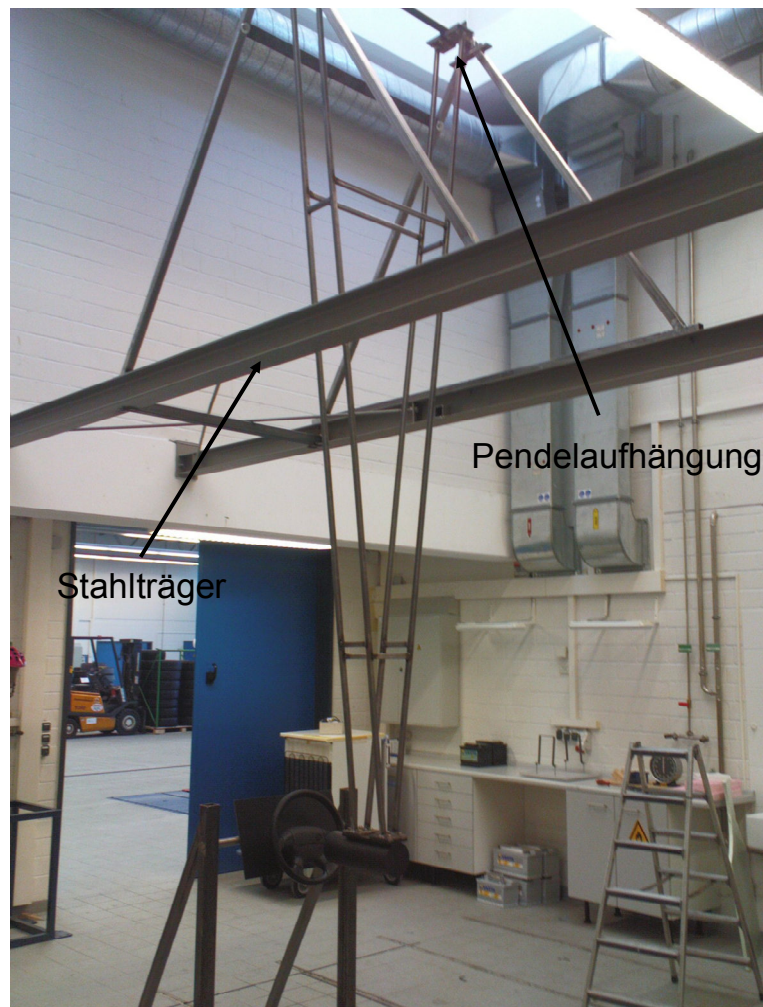


Abbildung 49: Versuchsraum, Aufbau mit Pendelaufhängung auf Stahlträger

Die Versuchsanlage bilden vier voneinander unabhängige Teile (Abbildung 50):

- Pendel – der Dummykopf, das Gewicht des Pendels und die Pendelaufhängung (Gestänge),
- Airbaghalterung und Airbagauslösemechanismus – die Befestigung des Airbags, der Durchschlagschutz des Pendels sowie der Auslösemechanismus für den Entfaltungsvorgang des Airbagmoduls,
- Auslösemechanismus für das Pendel – die Halterung für das Pendel und der Sicherheitsmechanismus gegen frühzeitige Auslösung des Pendels,
- Mess- und Dateneinheit – Highspeedkamera und Datenakquisitionseinheit.

Auf die Stahlträger wurde eine Pendelhalterung bzw. -aufhängung konstruiert und das Pendel selbst mit einem 50-Perzentilen-HIII-Dummykopf und dem Pendelgewicht



über eine Pendelaufhängung mit der Pendelhalterung verbunden. Über ein Seil wurde das Pendel hochgezogen und mittels eines Elektromagneten in der Auslöseeinheit in Startposition bzw. Anfangsposition gehalten. Zusätzlich wurde gegen frühzeitiges Auslösung durch Stromausfall etc. das Pendel mit einem mechanischen Sicherheitsbügel versehen. Über einen Auslöseknopf wurde das Pendelgewicht vom Elektromagneten und über ein Zugseil vom Sicherheitshaken getrennt. Durch die Unterbrechung des Lichtstrahls der Lichtschranke wurde der Auslösevorgang des Airbags eingeleitet. Gleichzeitig nahmen Highspeedkamera und Messtechnik den Versuch auf. Die Aktivierung durch die Lichtschranke musste zeitlich bis auf 1 ms genau erfolgen, damit bei  $t_0$  der Airbag maximal entfaltet sein würde und der Dummykopf in den Airbag würde eindringen können.  $T_0$  entsprach dem Nulldurchgang des Pendels bzw. dem Kollisionszeitpunkt des Airbags mit dem Dummykopf. Folgende Abbildung 50 zeigt den Versuchsaufbau der experimentellen Komponentenmethode (nicht maßstabsgetreu).

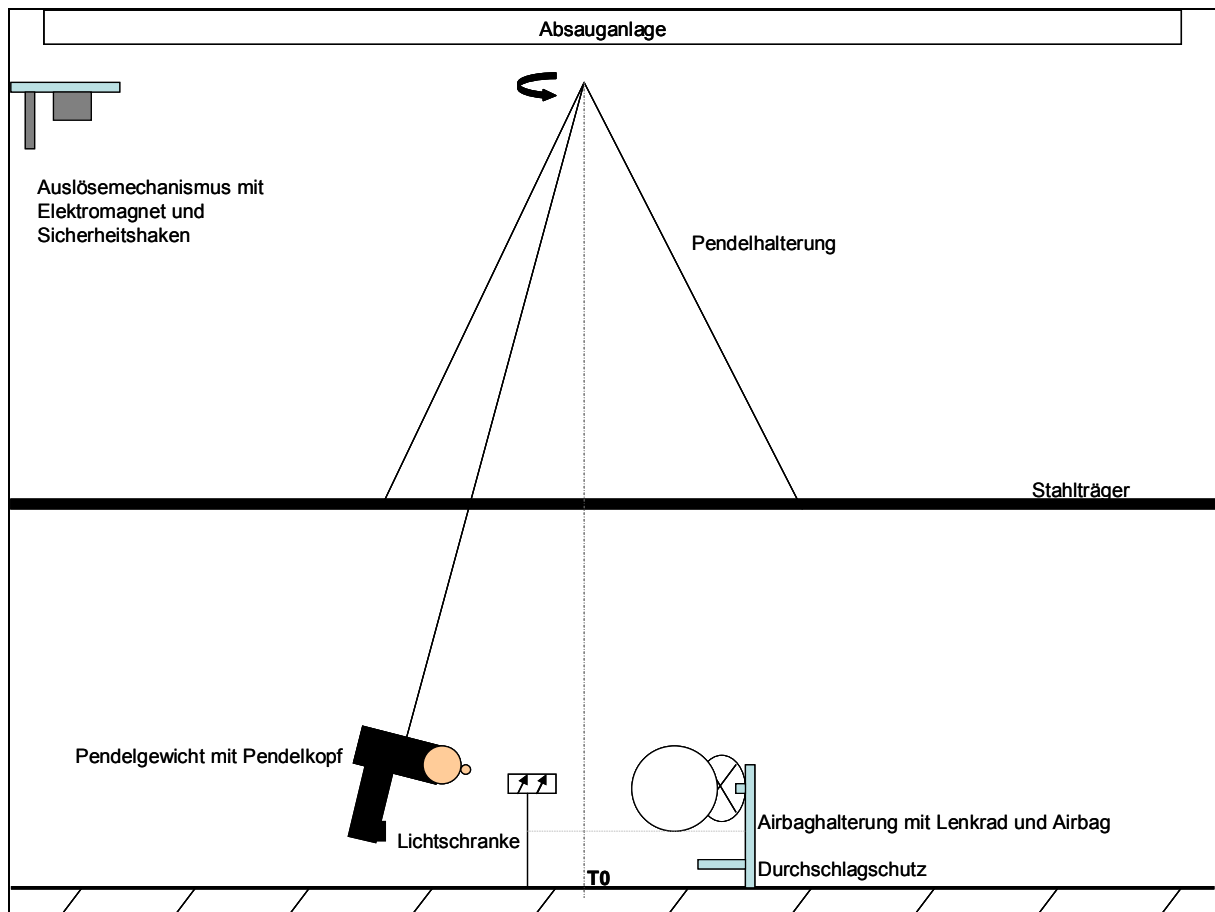


Abbildung 50: Skizze Aufbau experimentelle Komponentenmethode

### 3.4.3.1 Pendel

Abbildung 51 zeigt das Versuchspendel, das sich aus einem Dummykopf, einem Pendelgewicht, dem Pendelschwert sowie der Pendelaufhängung zusammensetzte. Der Versuchskopf bestand aus einem 50-Perzentilen-Frontalaufpralldummy. Ihm wurden wie in den vorangegangenen Versuchen durch einen Anthropologen die Ohren den anatomischen Begebenheiten eines 50-Prozent-Mannes nach DIN 33402 angepasst [24]. Das Pendelgewicht bestand aus einem Rundstahl.

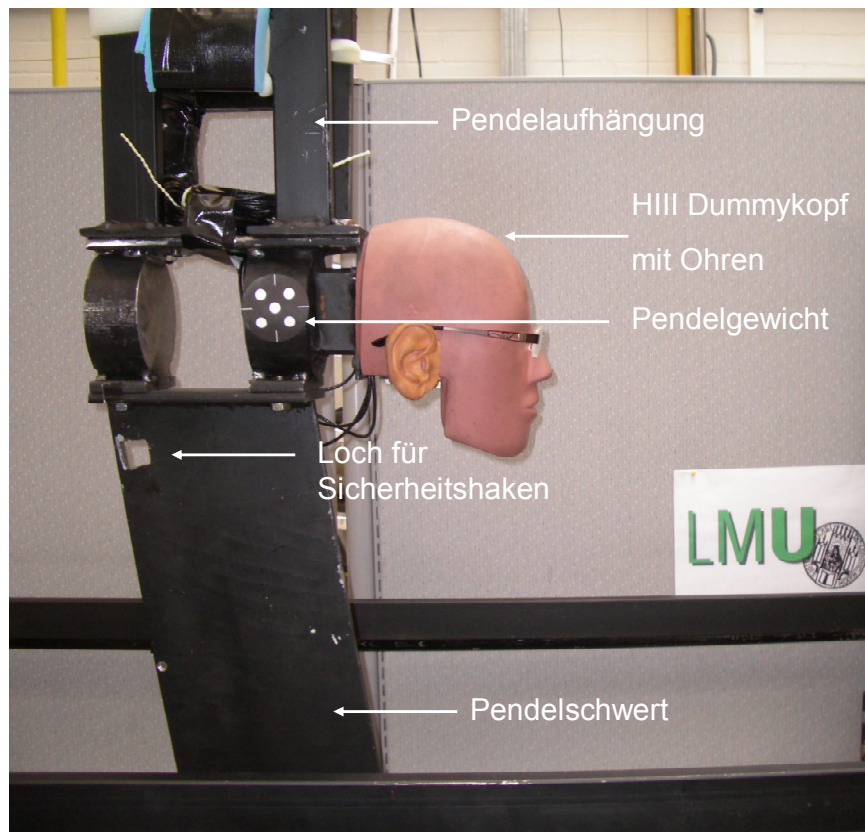


Abbildung 51: Versuchspendel mit HIII-Dummykopf

Das Pendelschwert diente als Durchschlagschutz. Ein progressiver Dämpfer, der in der Airbaghalterung befestigt war, wurde so eingestellt, dass das Pendelschwert den Dämpfer betätigen würde, bevor der Kopf auf das Lenkrad aufschlagen könnte. Dabei musste beachtet werden, dass der Dämpfer keinen Einfluss auf das Eintauchverhalten des Dummykopfes in den Airbag haben würde. Durch ein Loch im Schwert wurde ein mechanischer Sicherheitshaken in der Startposition befestigt. Er verhinderte z. B. im Falle eines Stromausfalls die vorzeitige Auslösung des Pendels. Die Pendelaufhängung hatte eine Länge von 3420 mm und entsprach so dem Abstand zwischen der Mitte der Achsaufhängung und dem Ende des Gestänges. Vom Ende des Gestänges bis zum Schwerpunkt des HIII-Kopfes lag eine Entfernung von 100 mm. Es ergab sich also eine gesamte Pendellänge von 3520 mm. Die Aufhängung des Pendels war nahezu reibungsfrei gelagert und hatte einen kleinen, aber vernachlässigbaren Einfluss auf die Geschwindigkeit des Pendels. Das Gesamtpendelgewicht, das in den Airbag eintauchte, betrug 35 kg, wurde aus dem Teststandard des Body-Block-ECE-R12-Versuchs übernommen und als Vorgabe herangezogen [12].

Über den Steinerschen Trägheitssatz [41]:

$$J = J_{\text{Körper}} + ml^2 \quad (12)$$

(mit  $J$  = Gesamtträgheit,  $J_{\text{Körper}}$  = Pendelträgheit<sub>Gesamt</sub>,  $m$  = Gesamtmasse,  $l$  = Pendellänge) wurden Dummykopf, Pendelgewicht, Pendelschwert und Pendelaufhängung errechnet und danach versuchsweise reduziert, damit das Pendeleintauchgewicht in den Airbag genau 35 kg entsprach.

Die Geschwindigkeit des Pendels wurde über die Energiebilanzen errechnet. Daraus ergab sich eine Pendelgeschwindigkeit von:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (13)$$

$$V_{\text{Pendel}} = \sqrt{2 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 3,52m} = 8,31 \frac{m}{s} \quad (14)$$

Umrechnung der Einheit auf Stunde [h]:

$$= 8,31 \frac{m}{s} * 3,6 = 29,91 \text{ km/h} \quad (15)$$

Die Geschwindigkeit, die beim Eintauchvorgang erreicht werden kann, beträgt demnach 29,91 km/h.

### 3.4.3.2 Airbaghalterung und Airbagauslösemechanismus

Die Airbaghalterung hat prinzipiell zwei Aufgaben. An erster Stelle dient sie der Installation verschiedener Airbagmodule. Die Module wurden auf einer 500 mm \* 300 mm großen Stahlplatte befestigt, deren Vorteil darin bestand, den Neigungswinkel der Airbagmodule individuell einstellen zu können. So ergab sich die Möglichkeit, nicht nur Fahrerairbagmodule, sondern auch Beifahrermodule zu testen. Die zweite Aufgabe der Airbaghalterung ist der Durchschlagschutz des Pendels. Am unteren Teil der Halterung befand sich wie bereits erwähnt ein progressiver Dämpfer, der bei Nichtauslösung des Airbagmoduls oder eventueller Durchdringung des Pendels die Anlage vor größeren Schäden schützte. Das wiederum bedingte, dass gera-

de die Airbaghalterung besonders stabil gebaut werden musste. Die fest am Boden verschraubten Auflageflächen der Halterungen mussten der Bewegungsenergie des Pendels standhalten (Abbildung 52).

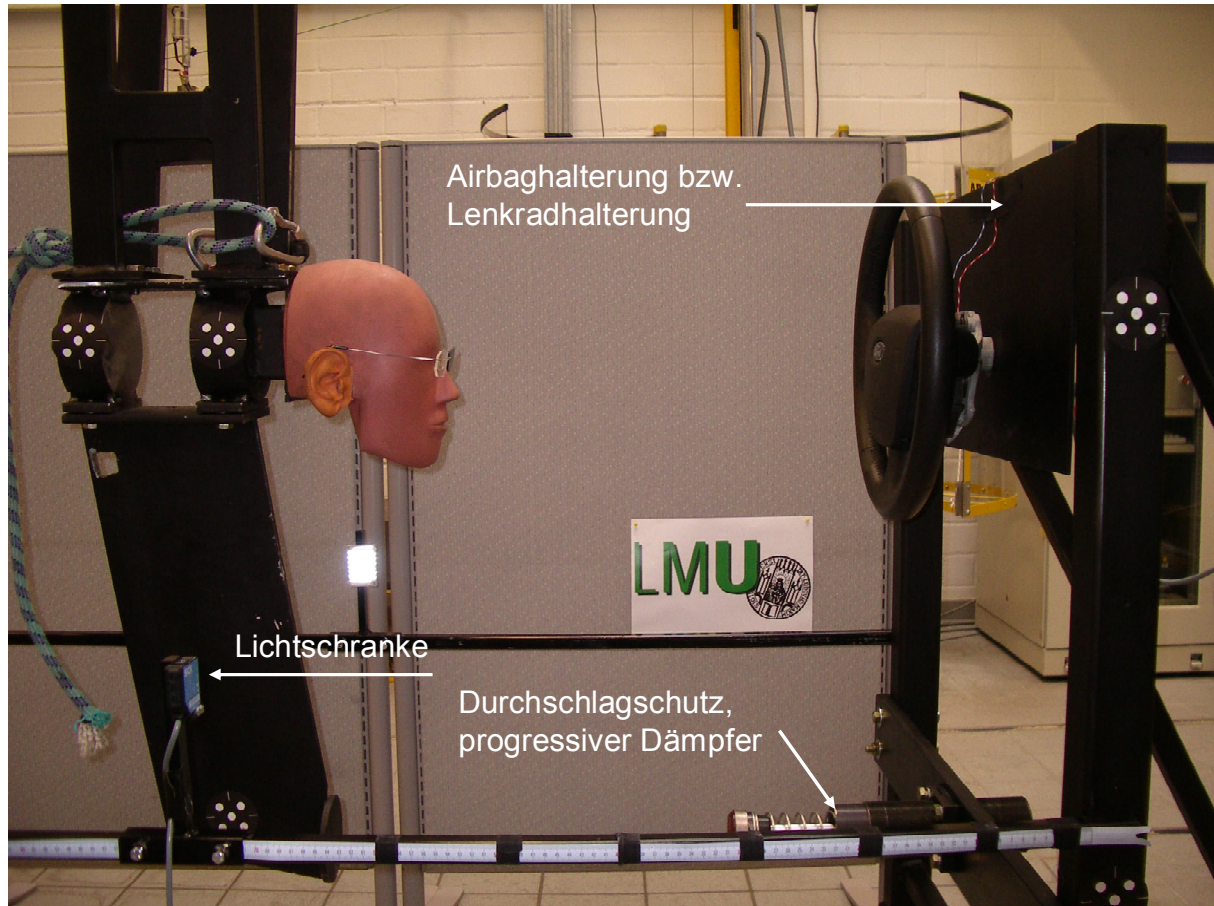


Abbildung 52: Airbaghalterung und Auslösemechanismus

Zur Auslösung des Airbagmoduls und zum Starten der Daten- und Videoaufnahme war eine Lichtschranke in die Bewegungsbahn des Pendels gebracht worden. Die Verzögerung der Auslösezeit war kleiner als 1 ms. Das Signal bzw. die Spannung, die von der Lichtschranke gegeben wurde, diente nicht als Auslösesignal, sondern als Triggersignal, das ein elektronisches Relais ansteuerte, das wiederum eine Spannung von mindestens 7 Volt direkt an die Kontakte des Airbags sandte. Zudem wurde ein Spannungssignal gesendet, um die Datenakquisition zu starten. Zwischen Relais und Airbagkontakten war ein Sicherheitsschalter eingebaut worden, der ein eventuelles vorzeitiges Auslösen des Airbags unterbinden sollte. Er musste kurz vor dem Versuch aktiviert werden (Abbildung 53).



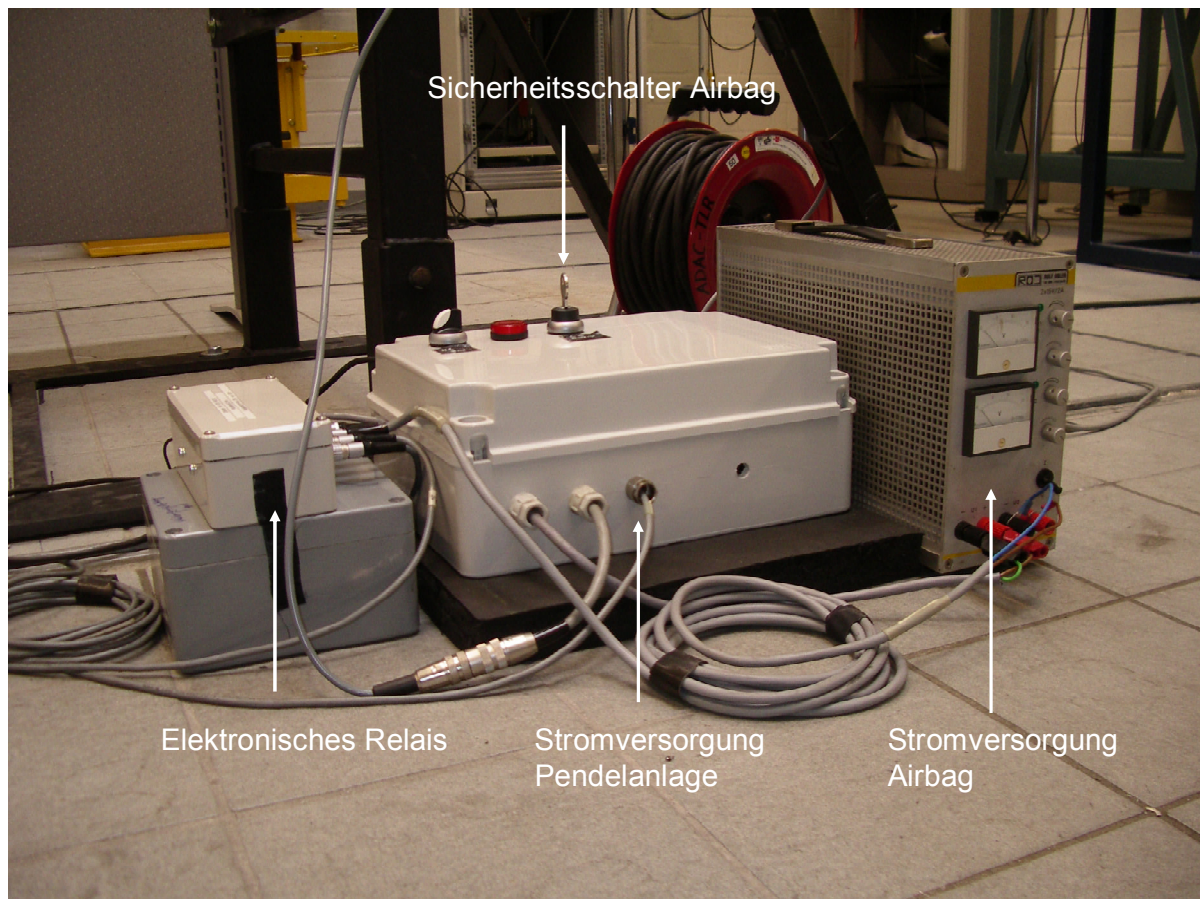


Abbildung 53: Elektronik/Pendelanlage

### 3.4.3.3 Pendelauslösemechanismus

An den Pendelauslösemechanismus (Abbildung 54) wurden zwei Anforderungen gestellt: Zum einen sollte er das Pendel auf einer vordefinierten Höhe mittels eines Elektromagneten halten und eine mechanische Notfalleinrichtung gegen frühzeitige Auslösung, z. B. bei Stromausfall, haben. Das Pendel wurde mittels Seil über eine Umlenkrolle auf die definierte Höhe gebracht und durch die Aktivierung des Elektromagneten in seiner Höhe gehalten. Gleichzeitig wurde ein mechanischer Haken durch das Schwert des Pendels geführt, der nur mithilfe eines manuell zu handhabenden Drahtseils deaktiviert werden konnte.

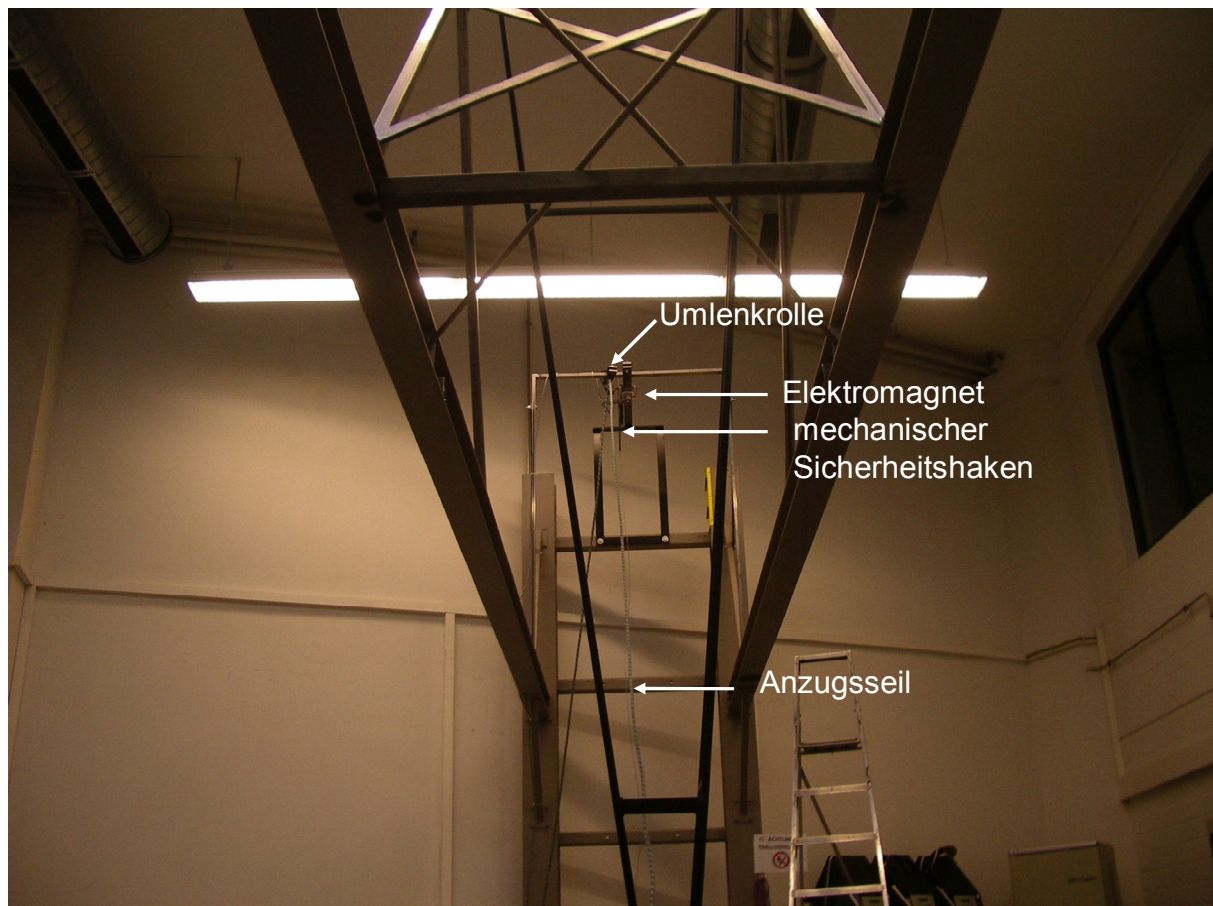


Abbildung 54: Pendelauslösemechanismus

### 3.4.3.5 Mess- und Dateneinheit

Für die Aufnahme der Versuche stand eine Highspeedkamera der Firma Solution mit einer Aufnahmefrequenz von 1000 Hz zur Verfügung. Die Aufzeichnung begann mit der Auslösung der Lichtschranke. Die Aufnahmedaten wurden in den internen Speicher der Kamera geladen und anschließend auf einen PC übertragen. Mit dem Programm Falcon wurde eine Filmdatei erstellt. Als Beschleunigungsaufnehmer wurde ein Sensor vom Typ MWS/BS 4301 mit einem Messbereich von  $\pm 200$  g im Schwerpunkt des Dummykopfes positioniert. Die Abtastrate des Sensors betrug dabei 5000 Hz.

### 3.4.3.4 Testmatrix

Für die Validierung der Anlage wurden fünf identische Pendelversuche durchgeführt (siehe Tabelle 7). Jeder Versuch hatte eine Fallhöhe von 3,52 m, was einer errechneten Geschwindigkeit beim Eintauchvorgang in den Airbag von 29,91 km/h ent-

sprach. Die Lichtschranke wurde so austariert, dass der Kopf des Dummys bei komplett entfaltetem Airbag im Nulldurchgang des Pendels eindringen konnte. Die vom Beschleunigungsaufnehmer festgehaltenen Verläufe sowie Minimal- und Maximalwerte wurden anschließend in den Versuchskorridor aus Kapitel 4.3.3 übertragen.

Als Airbag wurde ein Standard-Fahrerairbag mit einem Volumen von 45 Litern verwendet. Bei der Versuchsvorbereitung, Durchführung und Auswertung wurden die Versuchsvorgaben in Anlehnung an EuroNCAP und RCAR eingehalten.

Versuchsnr.	Volumen Airbag [l]	Fallhöhe Pendel [h]	CFC-Filterung	errechnete Geschwindigkeit [km/h]
1	45	3,52	1000	29,91
2	45	3,52	1000	29,91
3	45	3,52	1000	29,91
4	45	3,52	1000	29,91
5	45	3,52	1000	29,91
6	45	3,52	1000	29,91
7	45	3,52	1000	29,91

Tabelle 7: Versuchsmatrix, Validierung experimentelle Versuchsmethode



### **3.5 Untersuchung der Bruchfestigkeit von Brillen und Brillenmaterialien mittels experimenteller Komponentenmethode**

Im nächsten Schritt wurden Brillen- und Brillenmaterialien auf ihr Crashverhalten beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung mit der entwickelten experimentellen Komponentenmethode untersucht. Zum einem sollten die Ergebnisse wie unter 4.2.4 beschrieben überprüft und manifestiert, zum anderen die Validierung der experimentellen Komponentenmethode bestätigt werden.

#### ***3.5.1 Versuchsmatrix***

In den folgenden Versuchen wurden je randloses Brillenmodell jeweils fünf Versuche durchgeführt. Hat bei fünf Versuchen die Brille mindestens viermal einen Bruch erlitten, wurde sie als bruchgefährdet eingestuft. Bei nur dreimaligem Brechen wurden zwei zusätzliche Versuche durchgeführt.

Es wurden vier unterschiedliche Brillenmodelle getestet, die sich in Befestigung von Brillensteg und Brillenbügel unterschieden. Dabei wurde darauf geachtet, dass drei Brillenmodelle die vorangegangenen, in Kapitel 3.2 beschriebenen Versuche unbeschadet überstanden und drei Modelle einen Bruch erlitten hatten.

Die Vorversuche haben gezeigt, dass Tragrund- und Vollrand-Brillenmodelle tendenziell eine geringe Bruchgefahr mit sich bringen, weshalb jeweils nur drei Versuche durchgeführt und jeweils nur ein Brillenmodell verwendet wurde.

Der Brechungsindex der Gläser betrug auf der rechten und linken Seite jeweils 1,5. Er wurde bei allen Versuchen gleichgehalten. Der Fahrerairbag, der bei diesen Versuchen verwendet wurde, war ein Standard-45-Liter-Modul, mit dem die meisten der auf dem deutschen Markt vorkommenden Fahrzeuge ausgestattet sind. Tabelle 8 stellt die Versuchsmatrix dar.

Versuch	Brillentyp	Brechungsindex	Airbagvolumen [l]	Anzahl Versuche
1	randlos	1,5 / 1,5	45	5
2	randlos	1,5 / 1,5	45	5
3	randlos	1,5 / 1,5	45	5
4	randlos	1,5 / 1,5	45	5
5	randlos	1,5 / 1,5	45	5
6	randlos	1,5 / 1,5	45	5
7	Tragrand	1,5 / 1,5	45	3
8	Vollrand	1,5 / 1,5	45	3

Tabelle 8: Versuchsmatrix Brillen, experimentelle Versuchsmethode

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall

Die Versuche beschreiben die Kinematik von Dummy und Brillen beim Pkw- Frontalaufprall bei verschiedenen Kollisionsgeschwindigkeiten. Bei den drei durchgeführten Versuchen ist die Brille in ihrer Anfangsposition verblieben. In den Highspeedvideofilmen ist zu erkennen, dass die Brille trotz ihrer unterschiedlichen Trägheit gegenüber dem Kopf keine Bewegungen vollzieht. Tabelle 9 stellt die durchgeführten Versuche, die Anprallgeschwindigkeit und die Position der Brille dar.

Versuchsort	Dummy	Aufprall- geschwindigkeit [km/h]	Endposition Brille
AXA Winterthur	Hybrid-III	70	wie Anfangsposition
ADAC	Hybrid-III	64	wie Anfangsposition
DEKRA	Hybrid-III	20	wie Anfangsposition

Tabelle 9: Versuchsmatrix zu der Kinematik der Brille

Der nachfolgende Pkw-Frontalaufprall wurde unter EuroNCAP-Testbedingungen durchgeführt. Die Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeuges betrug 64 km/h gegen eine starre Barriere. Als zusätzliche Dokumentation des Versuches wurde im Innenraum der Fahrgastzelle eine Highspeedkamera montiert. Dadurch konnte der kinematische Bewegungsablauf beim Eindringvorgang des Dummykopfes und der Brille nachvollzogen werden. Prinzipiell ist der Vorgang bei allen durchgeführten Versuchen der gleiche. Einzig die Kollisionsgeschwindigkeit der Fahrzeuge war dabei zu unterscheiden.



**Ausgangslage 0 ms**



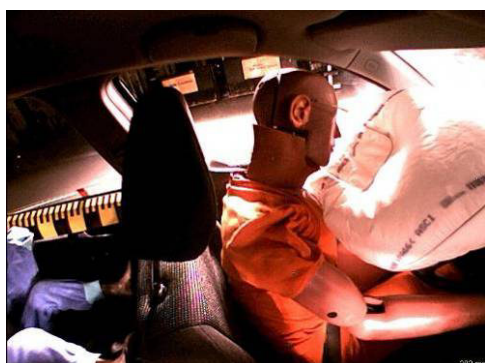
**35 ms**



**62 ms**



**98 ms**



**202 ms**



**450 ms**

Abbildung 55: Kinematischer Bewegungsablauf Dummy, Pkw-Frontalaufprall Fahrerseite

Bei  $T_0$  (Erstkontakt Stoßstange des Fahrzeugs mit Barriere, Beginn der Datenaufzeichnung) befindet sich der Dummy in seiner Ausgangslage (0 ms). Die Beschleunigungssensoren des Fahrzeugs werden durch den Aufprall aktiviert und geben ihr Signal an das Steuergerät weiter. Dabei wird der Grenzwert überschritten und es erfolgt eine Aktivierung des Airbagmoduls. Wegen seiner Trägheit gegenüber dem Fahrzeug bewegt sich der Dummy gemäß dem 1. Newton-Axiom weiter. Durch die Aktivierung des Gurtsystems wird der Oberkörper in seiner Vorwärtsbewegung eingeschränkt und zurückgehalten (35 ms). Zu diesem Zeitpunkt ist bereits der Airbag komplett entfaltet. Weil der Kopf des Dummys eine andere Trägheit besitzt als der Oberkörper, bleibt er auf seiner Trajektorie. Durch die Anbindung des Halses an den

Oberkörper erfährt der Kopf eine Rotationsbewegung. Der Kopf und Teile des Oberkörpers dringen in den Airbag ein (62 ms). Bei 98 ms nach Anprall ist bereits der Energieabbau des Insassen erfolgt und der Dummy beginnt mit der Reboundphase. Wie man in den Filmausschnitten sehen kann, ist die Brille in ihrer Ausgangslage verblieben. Dieses Ergebnis war auch bei zwei weiteren Pkw-Frontalaufprallversuchen zu beobachten. Die Kollisionsgeschwindigkeiten betrugen dort jeweils 22 km/h und 70 km/h.

## **4.2 Ermittlung der bruchgefährdeten Brillenfassung und der Linsenmaterialien**

Diese Versuche dienten der Vorselektion einer tendenziell bruchgefährdeten Brille [38]. Die bruchgefährdetsten Brillenmodelle aus dem überprüften Kollektiv wurden später auf der entwickelten Komponentenmethode einem erneuten Test unterzogen. Neben den drei verschiedenen Brillenfassungen, die auf dem deutschen Markt erhältlich sind, wurden weitere Schwerpunkte gelegt auf:

- Fassungen,
- Bohrlochdicken,
- Anzahl der Fragmente,
- Glassorte.

### ***4.2.1 Ergebnis erste Versuchsserie, Differenzierung von Brillentypen***

Betrachtet man die Versuche 1 bis 15 im Gesamten, so ist eine klare Tendenz zu erkennen. Alle Tragrund- und Vollrandfassungen trugen bis auf leichte Deformationen (z. B. Biegung der Fassung) keine gravierenden Schäden davon (Abbildung 56).



Abbildung 56: Tragrandfassungen mit leichten Deformationen

Auch bei den verwendeten Glasmaterialien kam es weder zu einem (makroskopisch erkennbaren) Riss noch zu einem Bruch der Gläser.

Die Versuche mit randlosen Fassungen hat keine der Brillen ohne größere Schäden überstanden. Jede Brille hatte einen Ausbruch des Bügels aus dem rechten oder linken Brillenglas (Tabelle 10). Es war zu beobachten, dass der Bruch eines Glases immer am Bohrloch begann bzw. das Loch mit einer Bruchlinie durchzogen wurde. Alle getesteten Brillenmodelle lagen in einem Wertebereich von  $\pm 4$  dpt (Abbildung 57 und Abbildung 58).



Abbildung 57: Randlose Fassung Versuch 13, Ausbruch am Mittelsteg

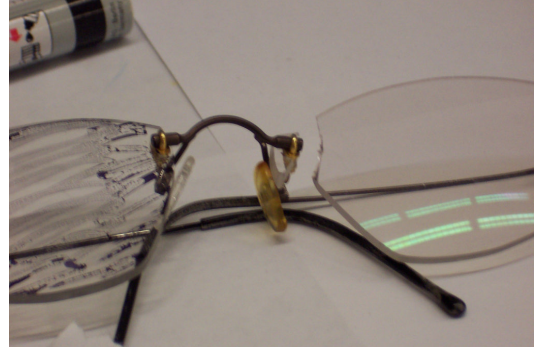


Abbildung 58: Randlose Fassung Versuch 11 und 12

Bei den Versuchen 1 bis 4 handelte es sich um Tragraudbrillen. Bei den Versuchen 5 bis 10 um Vollrandbrillen und bei den Versuchen 11 bis 15 um randlose Brillenmodelle.

Fassung/ Versuch	Fassungsart	Bruchstelle	Lokalisation Bruchstelle	Anzahl der Bruchstellen
1	Tragraud	Nein	---	---
2	Tragraud	Nein	---	---
3	Tragraud	Nein	---	---
4	Tragraud	Nein	---	---
5	Vollrand	Nein	---	---
6	Vollrand	Nein	---	---
7	Vollrand	Nein	---	---
8	Vollrand	Nein	---	---
9	Vollrand	Nein	---	---
10	Vollrand	Nein	---	---
11	randlos	Ja	rechtes Glas	1/3
12	randlos	Ja	Linkes Glas	1/3
13	randlos	Ja	linkes Glas	1/2
14	randlos	Ja	linkes Glas	1/2
15	randlos	Ja	rechtes Glas	1/2

Tabelle 10: Ergebnisse der ersten Versuchsserie

Bei der ersten durchgeführten Untersuchung zur Differenzierung der Brillengestelle bzw. Brillenmaterialien konnte die randlose Brille tendenziell als das bruchgefährdetste Modell identifiziert werden. Die getesteten Tragraud- und Vollrandbrillen stellten durch Bruch oder Ähnliches tendenziell kein Verletzungspotenzial im Gesichtsbereich für den Insassen beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung dar.

In der folgenden zweiten Versuchsserie wurde der Fokus auf randlose Modelle gelegt. Dort wurde die Brille speziell auf ihre Bruchneigung in Bezug auf Bohrung/Befestigung des Rahmengestells an den Gläsern untersucht.

Abbildung 60 zeigen die durchgeführten Spannungsmessungen zwischen Brillenglas mit randloser Fassung bzw. Brille mit Vollrandfassung vor dem Versuch. Je heller ein Bereich ist, desto höhere Spannungen liegen vor und umso höher ist auch die Wahrscheinlichkeit eines frühzeitigen Bruches.





Abbildung 59: Vollrandfassung

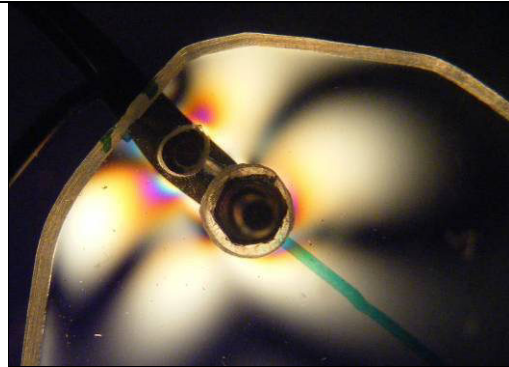


Abbildung 60: Randlose Fassung

Abbildung 61 zeigt ein Vollrandbrillenmodell nach dem Aufprall. Es kommt zu einer reversiblen Verformung des Brillengestells.



Abbildung 61: Verformung einer Vollrandfassung nach dem Aufprall

#### *4.2.2 Ergebnis zweite Versuchserie, Differenzierung von Gläsern/Fassungen*

In dieser Versuchsserie wurde der Schwerpunkt auf die Bruchneigung ungleicher randloser Fassungen gelegt. Diese Eigenschaft ist neben der Anzahl der Bruchstellen, ihrer Lokalisation und der Anzahl der Bruchstücke der Gläser in Tabelle 11 aufgeführt.

Von den 32 getesteten Fassungen wurden 16 Brillenfassungen durch einen Bruch beschädigt (50 %) und 17 der insgesamt 64 verarbeiteten Brillengläser zerstört (27 %).



Fassungsmodell	Fassung/Versuch	Bruchstelle	Anzahl Bruchstellen	Lokalisation Bruchstelle	Anzahl Glasscherbe (n)
I	16	Nein	---	---	---
	17	Nein	---	---	---
	18	Ja	1	Bügel rechts	2/2
	19	Ja	1	Bügel rechts	2/2
	20	Nein	---	---	---
	21	Ja	1	Steg links	2/2
	22	Nein	---	---	---
	23	Nein	---	---	---
II	24	Ja	1	Steg links	2/2
	25	Nein	---	---	---
	26	Nein	---	---	---
	27	Nein	---	---	---
	28	Nein	---	---	---
	29	Ja	1	Bügel links	2/2
	30	Nein	---	---	---
	31	Nein	---	---	---
III	32	Ja	2	Bügel rechts, Steg rechts	2;2/4
	33	Ja	2	Bügel rechts, Steg rechts	2;2/4
	34	Ja	3	Bügel links, Steg rechts, Steg links	2;2;2/6
	35	Ja	2	Bügel links, Steg links	2;3/5
	36	Nein	---	---	---
	37	Ja	1	Steg links	3/3
	38	Ja	1	Steg rechts	2/2
	39	Ja	2	Bügel rechts, Steg rechts	2;2/4
IV	40	Ja	2	Bügel links, Steg rechts	2;2/4
	41	Nein	---	---	---
	42	Nein	---	---	---
	43	Ja	1	Steg links	2/2
	44	Nein	---	---	---
	45	Ja	2	Bügel links, Steg links	2;2/4
	46	Ja	2	Bügel rechts, Steg rechts	2;6/8
	47	Nein	---	---	---

Tabelle 11: Bruchneigung randloser Fassungen nach Bruchneigung und Anzahl der Bruchstücke pro Fassung

Fassungs- model	Fassung/ Versuch	Spärische Wirk. Glas in 0 Grad Achslage (sph) oben:rechts unten:links	Bohrlochdicke rechtes Glas (mm) Steg / Bügel	Bohrlochdicke linkes Glas (mm) Steg / Bügel
I	16	-2	2,4/2,5	2,3/2,0
		-0,5		
	17	-0,5	2,2/2,0	2,5/2,9
		-1,5		
	18	-0,75	2,5/2,2	2,0/3,0
		-0,25		
	19	-0,25	2,0/2,0	2,3/2,5
		-0,75		
II	20	1,5	1,7/2,0	2,7/2,5
		1,25		
	21	0,25	2,0/2,5	2,0/1,6
		1,25		
	22	0,5	2,0/2,7	2,5/2,7
		1,5		
	23	0,75	2,5/2,9	2,0/2,0
		1,5		
III	24	-1	2,4/2,5	2,0/2,0
		-0,25		
	25	-0,75	2,1/2,0	2,5/2,6
		-1,25		
	26	-1,5	2,5/2,7	2,0/3,1
		-3,5		
	27	-4,6	2,0/3,0	2,5/2,5
		-0,75		
IV	28	0,25	2,0/2,0	2,7/2,5
		0,5		
	29	2,25	2,8/2,5	2,0/1,5
		1,25		
	30	1,25	2,0/2,3	2,5/2,3
		0,5		
	31	0,25	2,5/2,8	1,9/2,0
		0,5		
V	32	-1,75	3,0/2,5	2,3/2,0
		-1,5		
	33	-5	3,0/2,0	2,5/4,0
		-2,5		
	34	-0,25	2,5/1,7	2,0/2,0
		-0,25		
	35	-1,75	2,0/3,0	2,1/2,5
		-0,25		
VI	36	0,75	3,3/2,0	2,9/2,5
		1,5		
	37	1,5	2,0/2,5	2,0/2,5
		1,25		
	38	0,25	2,0/2,2	2,5/2,0
		2		
	39	0,75	2,5/2,1	2,4/2,0
		0,75		
VII	40	-0,75	2,0/2,5	2,0/2,0
		0		
	41	-1,25	2,0/2,0	2,5/2,0
		-1,5		
	42	-4	2,5/2,2	2,0/1,9
		-1,5		
	43	-2,75	2,0/2,6	2,1/2,5
		-0,5		
VIII	44	1,25	2,2/2,0	2,5/2,5
		2		
	45	1,75	3,1/2,5	2,0/2,4
		1,25		
	46	1,5	2,0/2,2	2,5/2,4
		1		
	47	1,25	2,5/2,4	2,6/2,0
		1,5		

Tabelle 12: Zweite Versuchserie, Darstellung nach Bohrlochdicken und nach Wirkung des Brillengla-  
ses

Für die weitere Betrachtung sind die Glasstärken der intakten sowie der zerstörten Brillenfassungen von Bedeutung. Dabei wird nicht die Glasstärke in der Standardschreibweise<sup>3</sup> angegeben, sondern nur ein sphärischer Mittelwert in null Grad Achslage, d. h. in horizontaler Richtung, gerundet auf den nächstmöglichen Handelswert<sup>4</sup>, stellt alle im zweiten Versuch getesteten Bohrlochdicken sowie die Wirkung des Glases gemäß Position (rechts/links) der Brillengläser dar.

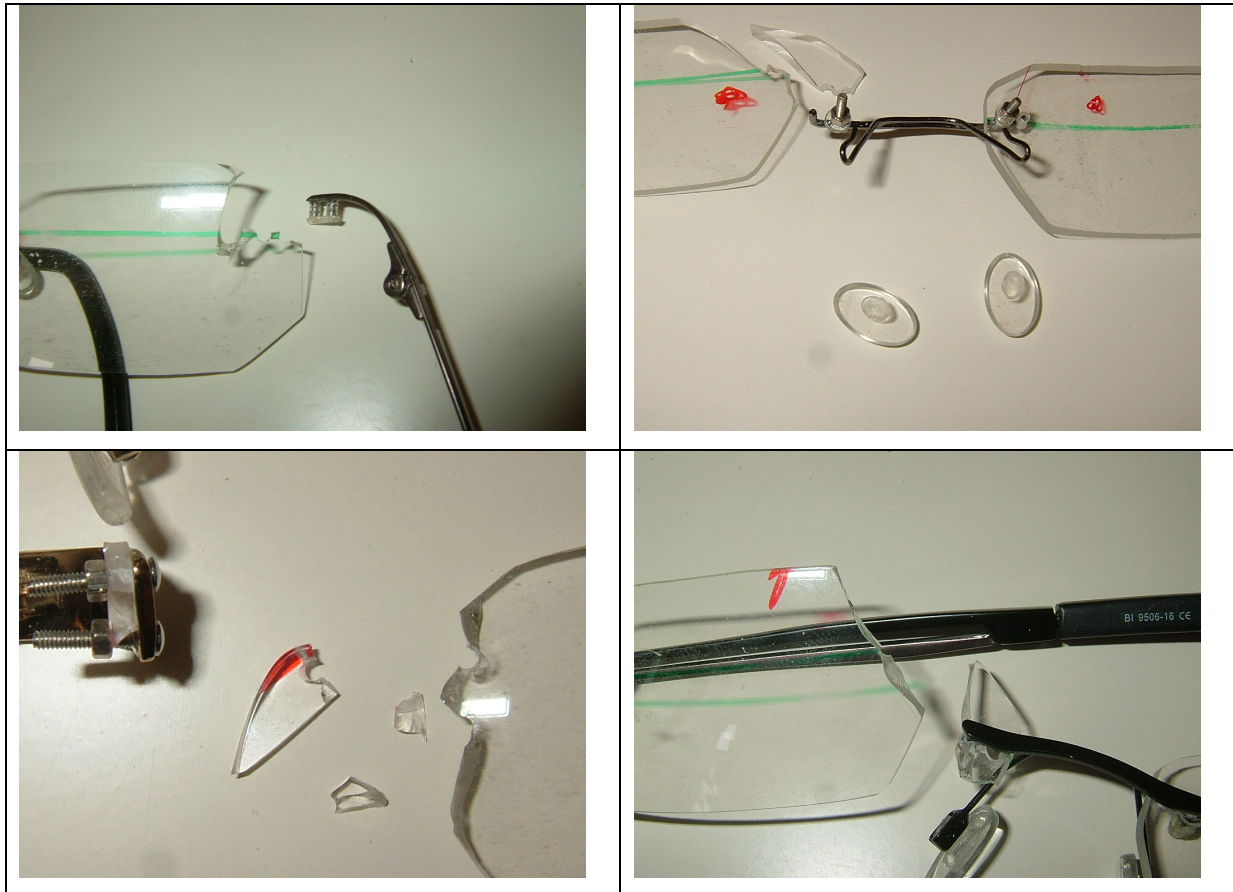


Abbildung 62: Bruchmuster und Splitterung zweite Versuchsserie

64 Gläser wurden in 32 randlosen Brillenfassungen verarbeitet. Dabei lagen 32 Gläser im Plusbereich und 32 Gläser im Minusbereich. Von diesen Gläsern haben 10 Gläser im Minusbereich und 7 Gläser im Plusbereich eine Bruchstelle. Das entspricht einem prozentualen Anteil der Bruchstellen im Minusbereich von ca. 32 % und im Plusbereich von ca. 22 %.

<sup>3</sup> Als Standardschreibweise einer Brillenglasstärke wird die sphärozyklindrische Schreibweise bezeichnet, in der die sphärische Wirkung, die Zylinderwirkung und die Achslage der zylindrischen Wirkung angegeben werden.

<sup>4</sup> Der Handelswert bedeutet, dass Brillengläser nur in Wirkungen mit 0,25 Dioptrien Unterschied gearbeitet werden, beispielsweise wäre von 1,75 dpt ausgehend der nächste Schritt 2 dpt.

Betrachtet man die Bohrlochdicken dieser Versuche, fällt auf, dass der Schwerpunkt der Untersuchung auf die geringeren Dicken gelegt werden muss. Brillen mit höheren Bohrlochdicken ( $> 3\text{ mm}$ ) werden selten verarbeitet und sind demnach eine Randerscheinung in der Brillenverarbeitung. Innerhalb dieser Versuchsserie waren sie dennoch zu einem geringen Anteil vertreten.

Wegen der Form eines Brillenglases konnte ebenfalls nicht vermieden werden, Bohrlochdicken unter  $2\text{ mm}$  zu verarbeiten. Zu beachten ist aber, dass Brillen durchaus einen geringeren Wert ( $< 2\text{ mm}$ ) aufweisen können.

Durchschnittlich kam es bei  $19,5\%$  (25 Mal) der 128 betrachteten Befestigungspunkte an den Verbindungen zwischen Brillenfassung und Linsenmaterial zu einem Bruch des Glases. Abbildung 63 zeigt die Verteilung der gebrochenen Gläser nach ihren Bohrlochdicken.

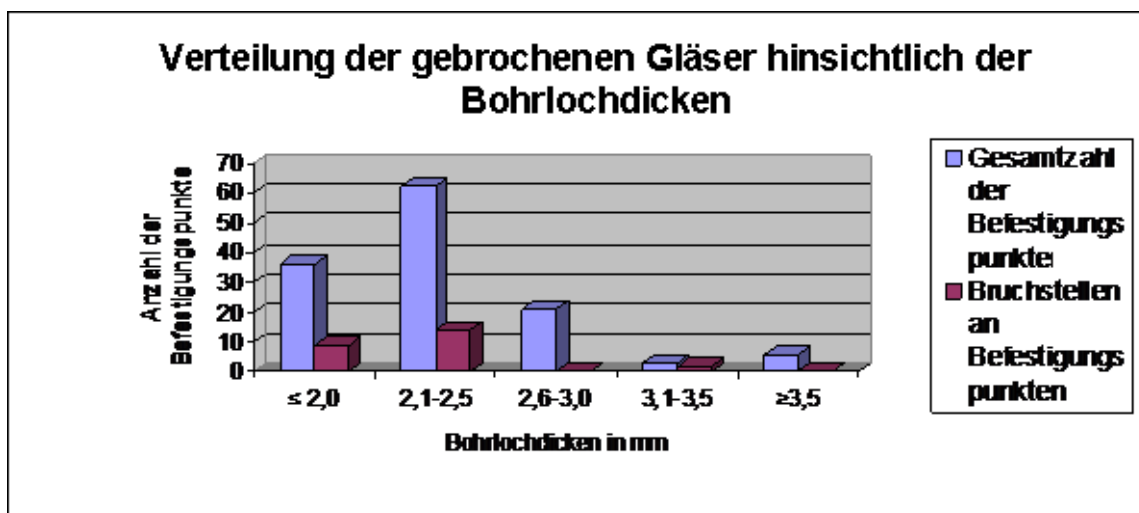


Abbildung 63: Verteilung gebrochene Gläser nach Bohrlochdicken

Die zweite Versuchsserie sollte nicht nur das tendenziell bruchgefährdetste randlose Brillenmodell selektieren, sondern auch für die dritte Versuchsserie als Testobjekt genommen werden, um die bruchgefährdetste Glassorte zu ermitteln. In Abbildung 64 ist deutlich erkennbar, dass die Brillenfassung des dritten Modells von allen vier Fassungen tendenziell die Fassung mit der höchsten Bruchgefahr darstellt. Beim dritten Fassungsmodell kam es zu den meisten Brüchen, weshalb es als Testfassungsmodell für die dritte Versuchsserie eingesetzt wurde.

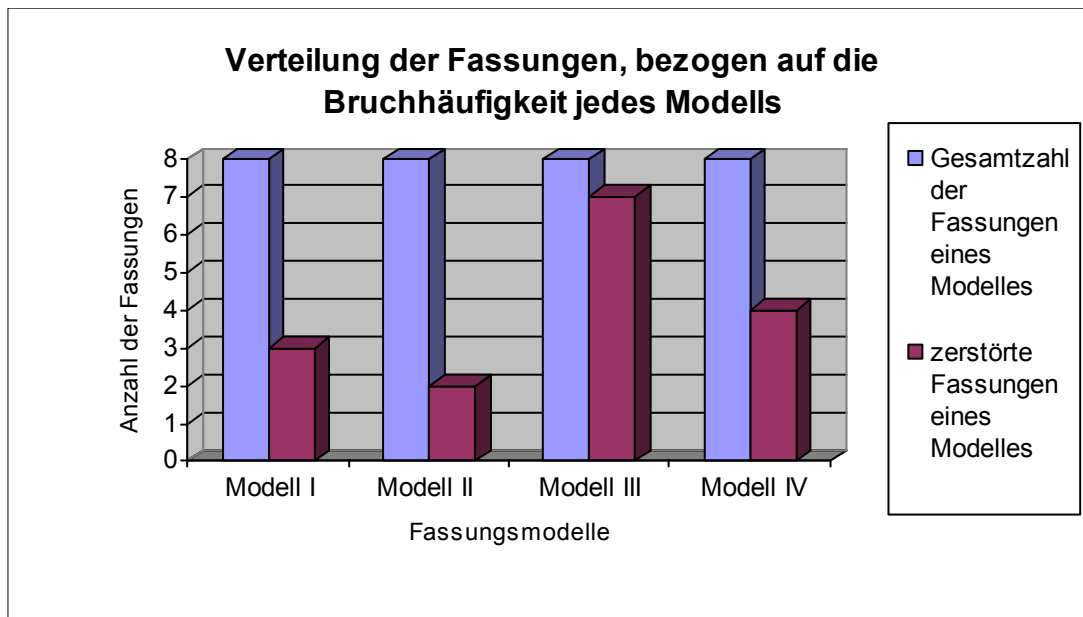


Abbildung 64: Bruchneigung randloser Brillenfassungen, zweite Versuchsserie

Das dritte Modell wies meist zwei Bruchstellen pro Brillenglas auf. Abbildung 65 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Bruchstellen bei allen vier Brillenmodellen.

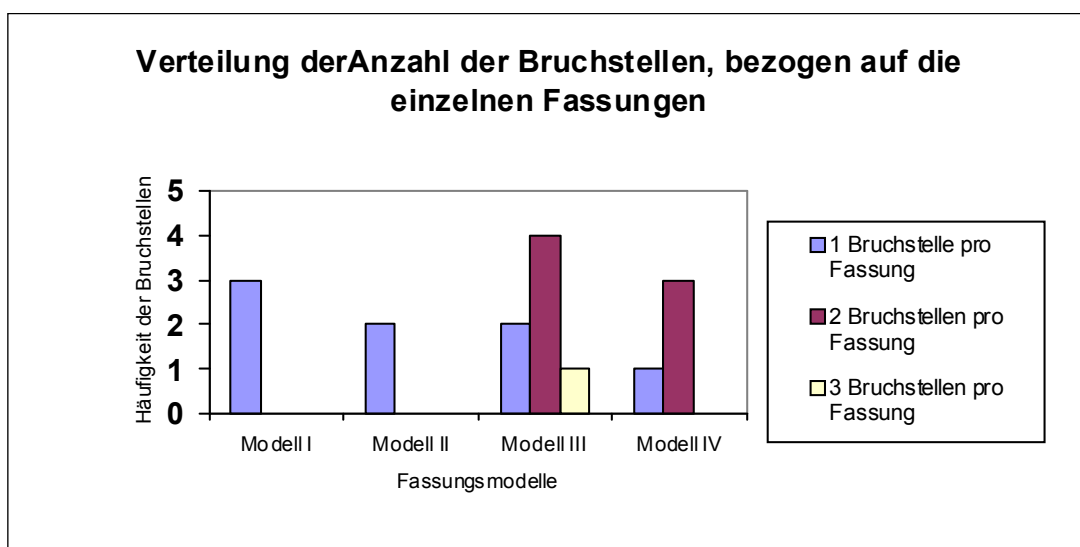


Abbildung 65: Häufigkeit der Bruchstellen

#### 4.2.3 Ergebnis dritte Versuchsserie, Differenzierung von Brillengläsern

In der dritten Versuchsserie wurden 40 randlose Fassungen mit 80 Gläsern getestet. 18 Fassungen und 22 Gläser erlitten einen Bruch. Insgesamt konnten 25 Bruchstellen lokalisiert werden. Tabelle 13 zeigt Bruchmuster, Anzahl und Lokalisation der Bruchstellen.

Die aus der dritten Versuchsserie gewonnenen Ergebnisse ermöglichen eine erste Bewertung der Bruchfestigkeit verschiedener Glasstärken.

Die Brillenglasarten können trotz unterschiedlicher Dicke und Material des Glases unterschiedliche Wirkungen haben. Je höher der Brechungsindex ist, desto dünner kann ein Brillenglas bei gleicher Wirkung gearbeitet werden. Abbildung 66 zeigt die Verteilung der gebrochenen Gläser in der dritten Versuchsserie im Gesamtvergleich hinsichtlich ihrer dioptrischen Wirkung. Von insgesamt 40 getesteten Brillengläsern brachen 22,5 % im Minusbereich und 27,5 % im Plusbereich.

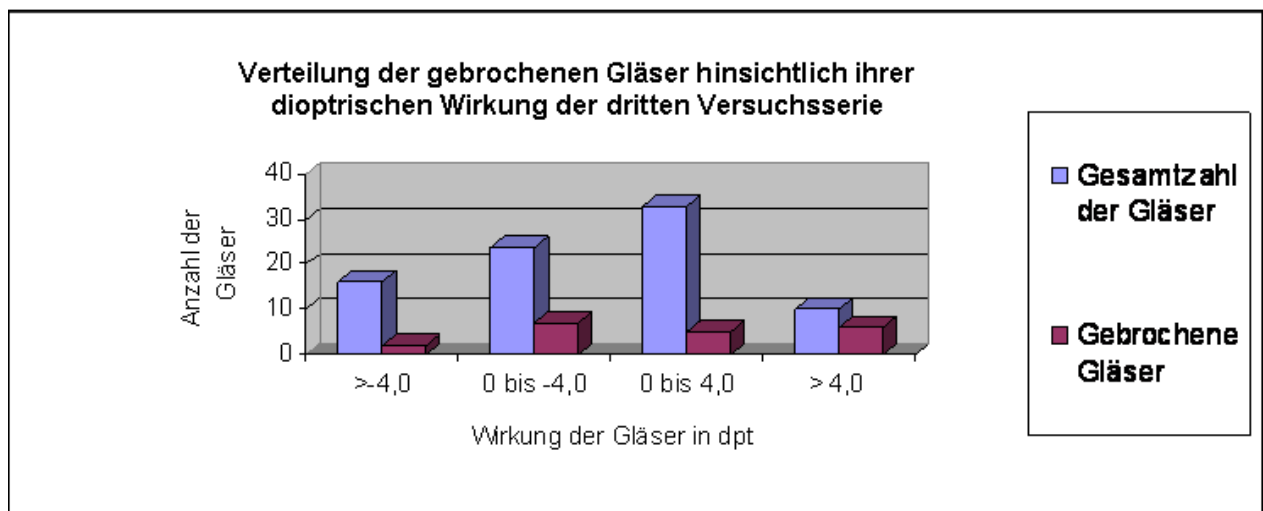


Abbildung 66: Verteilung der gebrochenen Gläser nach ihrer dioptrischen Wirkung

Brechungsindex Glas (n)	Fassung/ Versuch	Bruchstelle	Anzahl Bruchstellen	Lokalisation Bruchstelle	Anzahl Glasscherben
1,5 (Standard)	48	Ja	1	Steg rechts	2/2
	49	Ja	1	Steg rechts	2/2
	50	Ja	2	Steg rechts, Steg links	2, 2/4
	51	Ja	1	Steg rechts	2/2
	52	Ja	1	Bügel links	3/3
	53	Ja	1	Steg links	2/2
	54	Nein	---	---	---
	55	Ja	3	Bügel links, Steg rechts, Steg links	2, 2, 3/7
1,6 (mittelbrechend)	56	Nein	---	---	---
	57	Nein	---	---	---
	58	Ja	1	Steg rechts	2/2
	59	Nein	---	---	---
	60	Nein	---	---	---
	61	Nein	---	---	---
	62	Nein	---	---	---
	63	Ja	1	Steg rechts	2/2
1,67 (hochbrechend)	64	Nein	---	---	---
	65	Ja	1	Steg links	2/2
	66	Nein	---	---	---
	67	Nein	---	---	---
	68	Nein	---	---	---
	69	Nein	---	---	---
	70	Nein	---	---	---
	71	Nein	---	---	---
1,74 (sehr hochbrechend)	72	Nein	---	---	---
	73	Nein	---	---	---
	74	Ja	1	Steg rechts	2/2
	75	Ja	1	Steg rechts	2/2
	76	Ja	2	Bügel links, Steg links	3, 4/7
	77	Ja	2	Bügel rechts, Steg links	2, 2/4
	78	Ja	1	Steg rechts	2/2
	79	Ja	3	Bügel links, Steg rechts, Steg links	2, 2/4
1,58 (Polycarbonat)	80	Nein	---	---	---
	81	Nein	---	---	---
	82	Nein	---	---	---
	83	Nein	---	---	---
	84	Nein	---	---	---
	85	Nein	---	---	---
	86	Ja	1	Steg links	2/2
	87	Ja	1	Steg links	2/2

Tabelle 13: Darstellung des Bruchmusters – Anzahl und Lokalisation der Bruchstellen

Die Verteilung der gebrochenen Gläser hinsichtlich ihrer Bohrlochdicken ist in Abbildung 67 dargestellt. Die tendenzielle Bruchgefährdung liegt im unteren Bereich der Bohrlochdicke von 2,1 mm bis 2,5 mm. Von den 160 Prüfpunkten konnten 25 Bruchstellen lokalisiert werden – etwa 16 % der Prüfpunkte der dritten Versuchsserie.

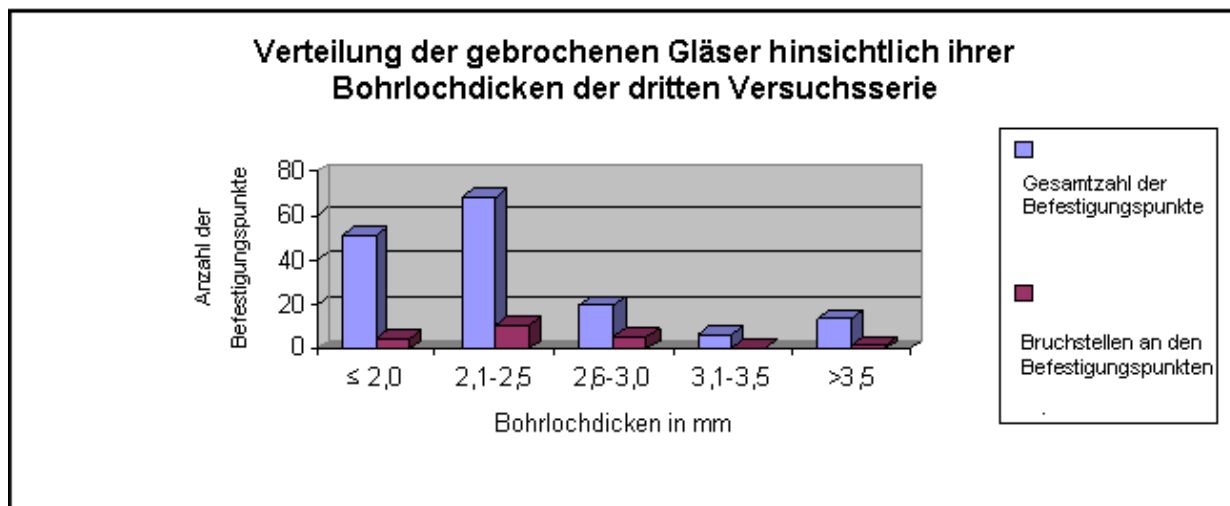


Abbildung 67: Verteilung der gebrochenen Gläser nach ihren Bohrlochdicken

Eines der Hauptziele der dritten Versuchsserie bestand darin, Brillenglasmaterial zu untersuchen, das die größte Bruchgefahr birgt. Abbildung 68 zeigt, dass das Brillenmaterial mit dem Brechungsindex von 1,5 die tendenziell größte Bruchgefahr beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung aufwies.

Neben dem Standardglas mit dem Brechungsindex von 1,5 gehörte auch das hochbrechende Glas mit einem Index von 1,74 zu den zwei Glasarten, die im Vergleich mit den anderen Glasarten eine Bruchgefahr darstellten. Bei diesen beiden Glasarten kam es bei mehr als 80 % zu einem Bruch, im Unterschied dazu waren bei allen anderen Glasarten weniger als 20 % zerstörte Gläser zu finden.

80 % aller Bruchstellen waren im Mittelteil bzw. am Steg der hier verwendeten Fassungen zu finden, 20 % an den Befestigungspunkten der Bügel oder in unmittelbarer Nähe. Somit zeigt sich für die Verteilung der Bruchstellen eine eindeutige Tendenz: Der Steg der Fassung ist tendenziell der Schwachpunkt und weist eine erhöhte Bruchgefahr auf.



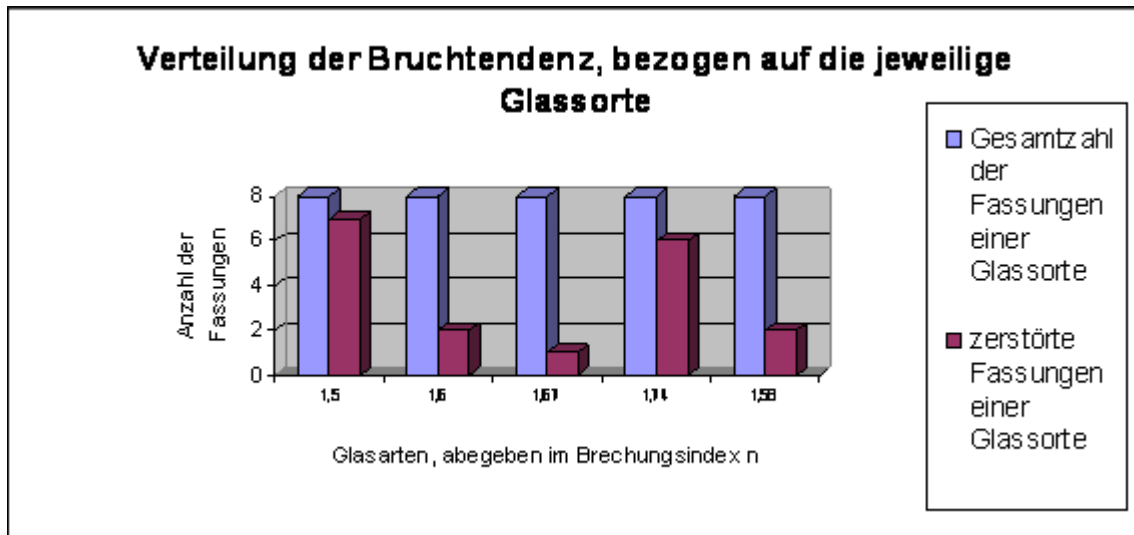


Abbildung 68: Bruchtendenz bezogen auf die Glassorte

#### 4.2.4 Zusammenfassendes Ergebnis der bruchgefährdeten Brillenfassungen und Linsenmaterialien

Für eine Gesamtbetrachtung aller drei Versuchsreihen kamen folgende Kriterien in Betracht, welche die Bruchgefahr einer Brille darstellen und bestimmen sollten:

- Art der Fassung,
- Bohrlochdicke (Bohrlochdurchmesser),
- Lokalisation des Bruches bzw. der Bruchstelle,
- Brechungsindex, Linsenmaterial.

Es zeigte sich in der ersten Versuchserie, dass gerade randlose Brillenmodelle eine tendenziell erhöhte Bruchgefahr beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung aufweisen. Deshalb wurde der Schwerpunkt in den folgenden zwei Versuchsserien auf randlose Brillenmodelle gelegt und die oben genannten Einflussparameter variiert und untersucht. Betrachtet man alle infrage kommenden Brillen aus den Versuchen, kommen 67 randlose Brillenfassungen mit 272 Befestigungspunkten in Betracht. Dabei mussten 50 Bruchstellen genauer analysiert werden.

Stellt man die Bohrlochdicken gegenüber, zeigt sich eine erhöhte Bruchgefahr im Bereich von 1,7 mm bis 3,0 mm.

Bei der Lokalisation der Bruchstellen konnten in der ersten und zweiten Testserie keine klaren Tendenzen herausgearbeitet werden. In der dritten Testserie hingegen

zeigte sich deutlich, dass die Gläser zunehmend am Steg einer Fassung brechen. Bei insgesamt 50 Brüchen befanden sich 16 Bruchstellen am Fassungsbügel (32 %) und 34 Brüche (68 %) an den Stegen der Fassungen.

Bei den Glasmaterialien bzw. den unterschiedlichen Brechungsindizes zeigte sich, dass gerade eine Standardverglasung (Brechungsindex = 1,5) in den Vorversuchen die häufigste Bruchgefahr birgt. In Abbildung 69 ist die Brille dargestellt, die in den durchgeführten Vorversuchen tendenziell die höchste Bruchgefahr für einen Insassen beim Pkw-Frontalaufprall darstellte.

Sie besaß folgende Eckdaten:

- randloses Brillengestell,
- Kunststoffgläser (CR-39),
- Bohrlochdicke zwischen 2,1 mm und 2,5 mm,
- Brechungsindex von  $n = 1,5$ ,
- starre Linsenbefestigung mit zwei Verschraubungen.

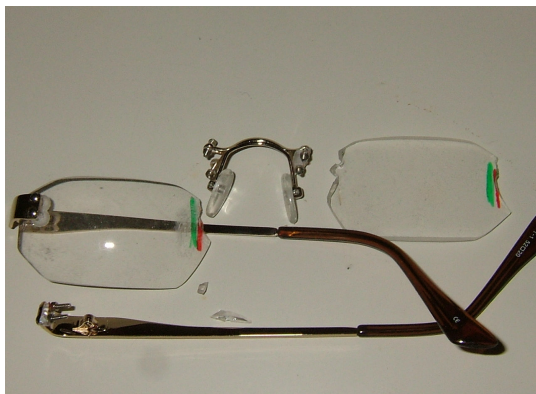


Abbildung 69: Bruchgefährdetste Brille

### 4.3 Ergebnisse der Ermittlung der Parameter für Pkw- Frontal- aufprall (EuroNCAP, RCAR)

#### 4.3.1 Unterer Geschwindigkeitsbereich, RCAR-Versuch

Die Kollisionsgeschwindigkeit beim RCAR-Versuch betrug 20 km/h, wobei der Airbag gerade noch über die Beschleunigungssensoren aktiviert wurde. Die maximale Verzögerung des Dummykopfes beim Eintauchvorgang in den Airbag betrug ~ 19 g. Die Kopfbeschleunigung des Dummys in x-Richtung wurde nahezu linear bis zum Maximalwert abgebaut. Nach der Reboundphase befand sich der Kopf wieder in der Ausgangsposition analog vor der Kollision. Abbildung 70 stellt die Beschleunigungskurven des RCAR-Versuchs dar.

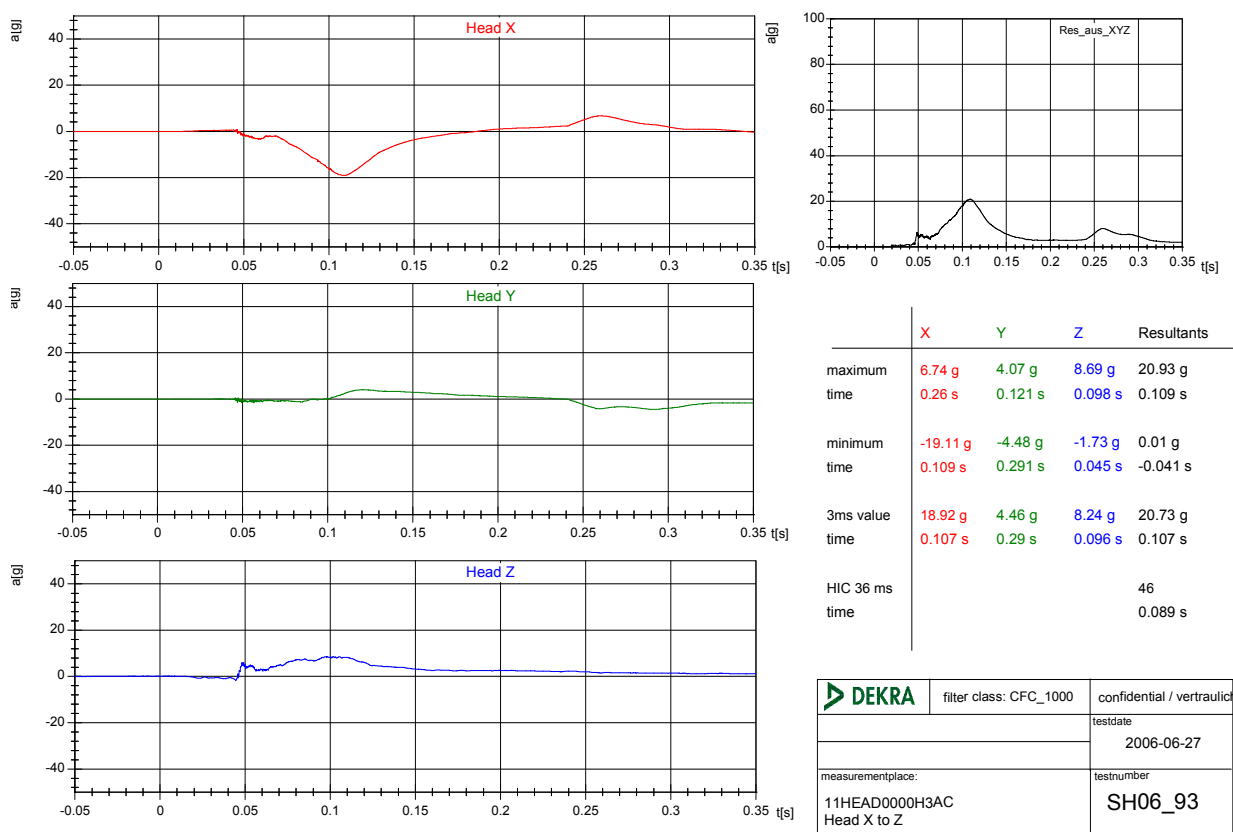


Abbildung 70: RCAR-Versuch Kopfbeschleunigungen (Untergrenze)

Die Brille, die sich im Kapitel 4.2.4 als das bruchgefährdeste Modell herausgestellt hatte, ist im Versuch gebrochen. Die Lokalisation der Bruchstellen liegt im Bereich

des Mittelstegs des Brillenmodells. Die Bruchstücke (siehe Pfeil untere Abbildung) der Gläser sind teilweise in der Oberfläche des Dummys verblieben (Abbildung 71).

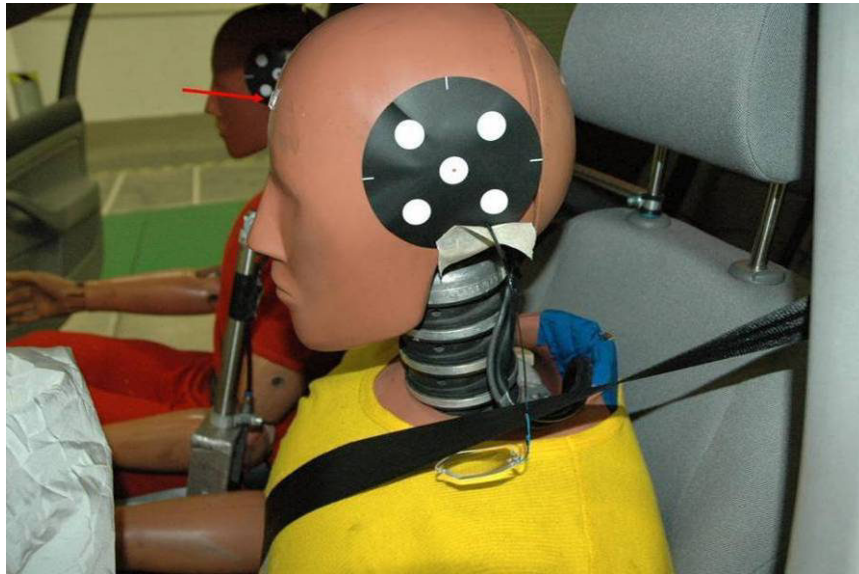


Abbildung 71: Postcrash Dummy

Die Brille wurde in der Vorbereitungsphase blau eingefärbt, um die Kinematik der Brille durch Färbung am Auftreffpunkt der Brille im Fahrzeug bzw. auf dem Airbag im Hochgeschwindigkeitsfilm besser nachvollziehen zu können.



Abbildung 72: Auftreffpunkt Brille

An der Blaufärbung in Abbildung 72 erkennt man, dass die Brille (rechtes Glas) den Airbag mittig rechts getroffen hatte.

### 4.3.2 Oberer Geschwindigkeitsbereich, EuroNCAP-Versuch

Beim EuroNCAP-Pkw-Frontalaufprallversuch wurde eine Kollisionsgeschwindigkeit von 64 km/h erreicht. Die Beschleunigung beim Eintauchvorgang des Dummykopfes in den Airbag betrug ~ 49 g (Abbildung 73).

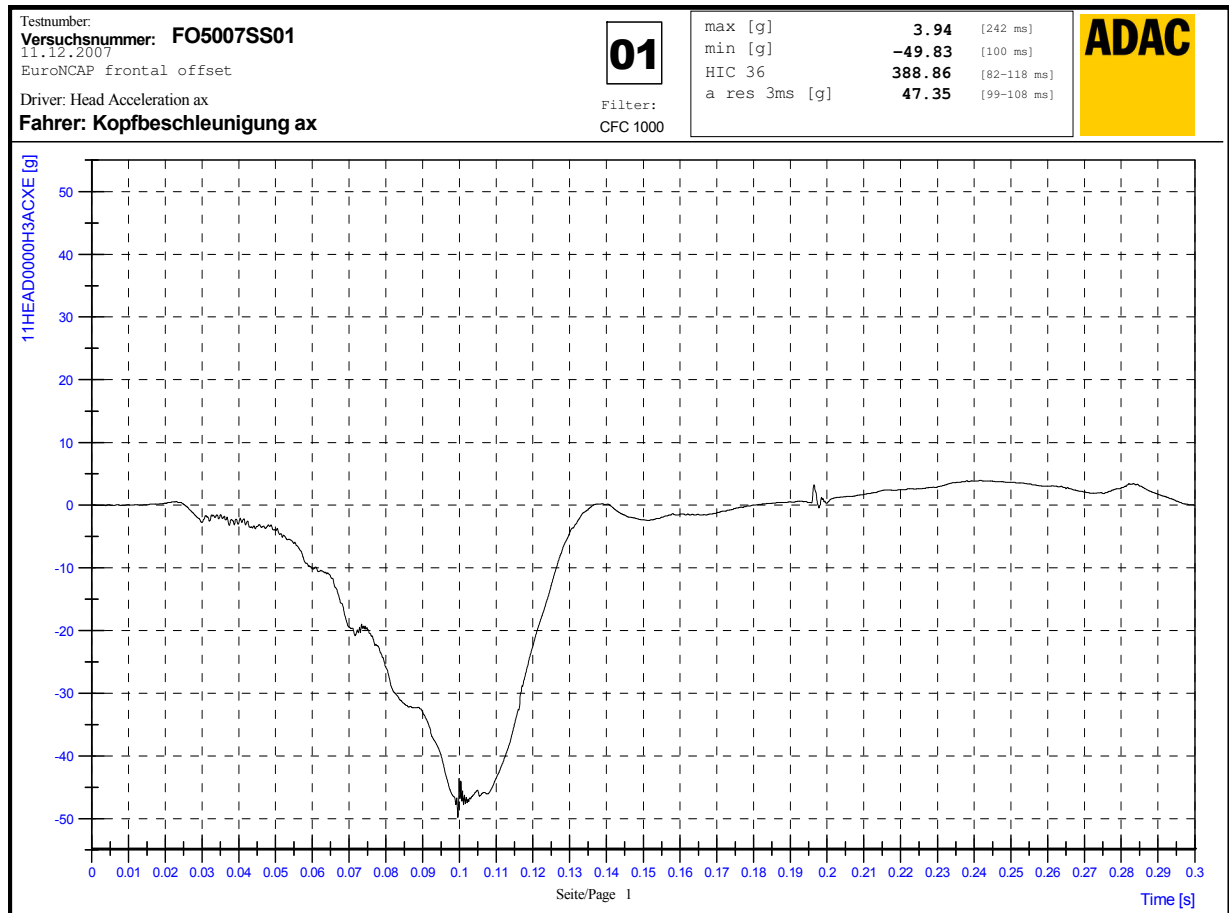


Abbildung 73: EuroNCAP-Pkw-Frontalaufprallversuch, Kopfbeschleunigung (Obergrenze)

Wie auch beim RCAR-Versuch ist die Brille beim Eintauchvorgang in den Fahrerairbag zerstört worden. Die Lokalisation der Bruchstelle befindet sich im Bereich des Mittelsteges. Abbildung 74 und Abbildung 75 zeigen den Anfangszustand von Dummy und Brille vor dem Versuch und den Endzustand der Brille nach dem EuroNCAP-Pkw-Frontalaufprallversuch.



Abbildung 74: Precrash EuroNCAP

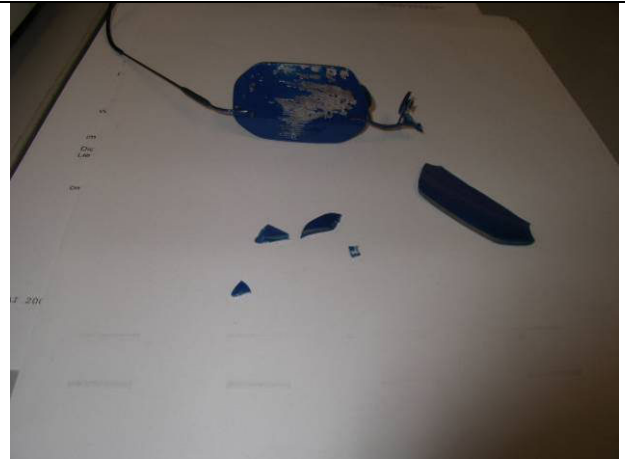


Abbildung 75: Postcrash Brille

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse aller Korridorversuche dargestellt. Die Kollisionsgeschwindigkeiten  $v_{\text{Koll}}$  variieren von 20 km/h unter RCAR-Testbedingungen bis 64 km/h unter EuroNCAP-Testbedingungen. Es wurden kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen  $\Delta v$  zwischen 17,5 km/h und 57,3 km/h erreicht. Die maximal auftretende Kopfverzögerung beim Eintauchvorgang in den Airbag betrug ca. 50 g (EuroNCAP) und die minimale auftretende Kopfverzögerung ca. 13 g (RCAR).

Durchführungsprotokoll	Kollisionsgeschwindigkeit [km/h]	$\Delta v$ [km/h]	max. Kopfbeschleunigung [g]	Endzustand Brille
EuroNCAP	63	58	-49,83	Brille defekt
RCAR	20	18	-19,11	Brille defekt
EuroNCAP	63	57	-39,47	ohne Brille
ECE-R12	58	55,2	-39,10	ohne Brille
ECE-R33	60	57,3	-34,32	ohne Brille
RCAR	20	17,5	-12,73	ohne Brille

Tabelle 14: Ergebnisse Korridorversuche

#### 4.3.3 Generierung Beschleunigungskorridor

In Abbildung 76 sind alle Beschleunigungskurven aus den Korridorversuchen in ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm übertragen worden. Es zeigt sich, dass die Kurve des EuroNCAP-Versuchs (rot) die Obergrenze und die Kurve des RCAR-Versuchs (hellblau) die Untergrenze bildet.



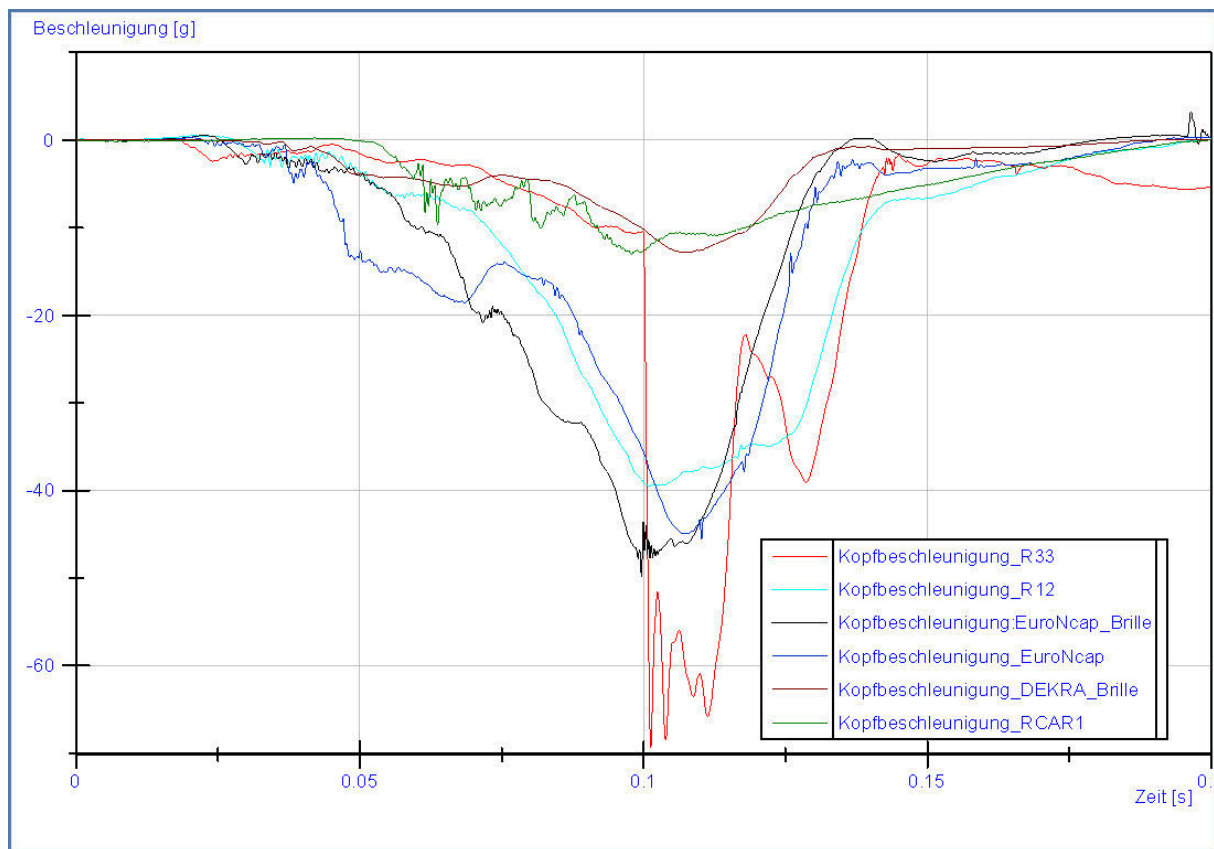


Abbildung 76: Kopfbeschleunigungen Korridorversuche

Mithilfe des Programms Diadem 11.0 der Firma National Instruments wurden die Minimal- und Maximalwerte errechnet. Anschließend wurde eine Hüllkurve erzeugt und damit der Korridor für die Entwicklung der experimentellen Komponentenmethode generiert. Der Beschleunigungskorridor für die experimentelle Versuchsmethode ist in Abbildung 77 dargestellt.

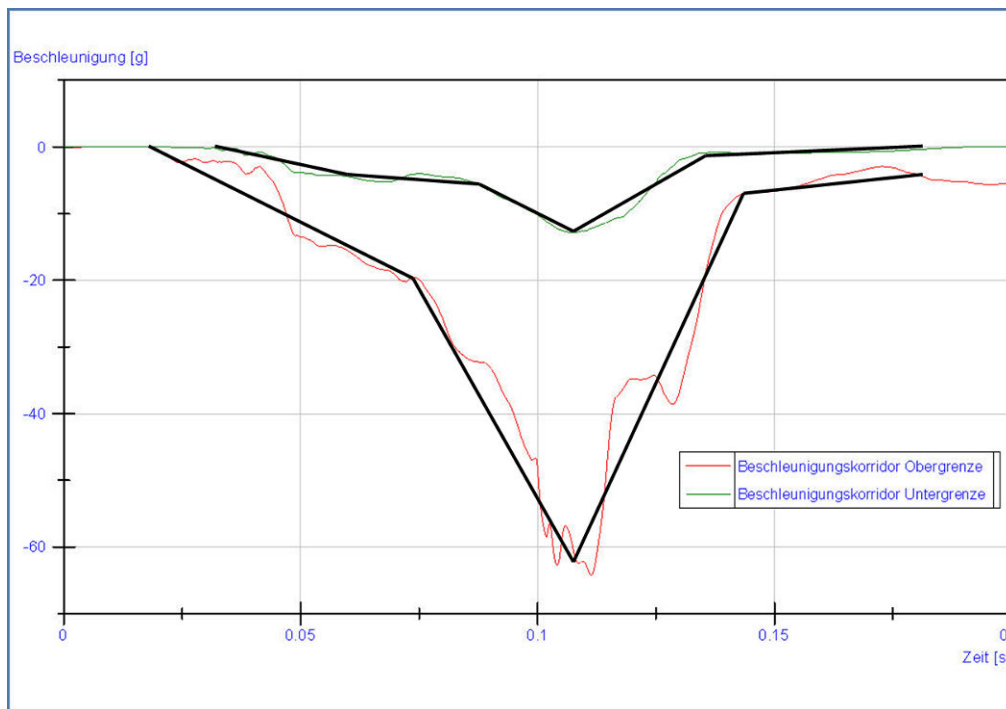


Abbildung 77: Beschleunigungskorridor Kopf, Pkw-Frontalaufprall

#### 4.4 Ergebnisse der Validierung der experimentellen Komponentenmethode zur Überprüfung von Brillen und ihren Materialien beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung

Dieses Kapitel behandelt die Ergebnisse der Validierung der experimentellen Komponentenmethode. Abbildung 77 zeigt den zeitlichen Bewegungsablauf des Hybrid-III-Dummykopfes beim Eintauchvorgang in den Airbag.

Bei  $t_0$  erfolgt die Auslösung des Triggersignals durch die Aktivierung der Lichtschranke, wenn der Dummykopf den Strahl der Lichtschranke unterbricht. Das Triggersignal startet die Zündung des Airbags sowie die Daten- und Videoaufnahme.

Nach 5 ms ist der Zündungsvorgang des Airbags abgeschlossen und die Airbag-gase füllen gleichmäßig den Luftsack. Nach 35 ms ist das Airbagmodul komplett entfaltet und der Eintauchvorgang bzw. der Energieabbau des Dummykopfes beginnt. Nach 60 ms ist der Eintauchvorgang des Kopfes vollständig abgeschlossen.

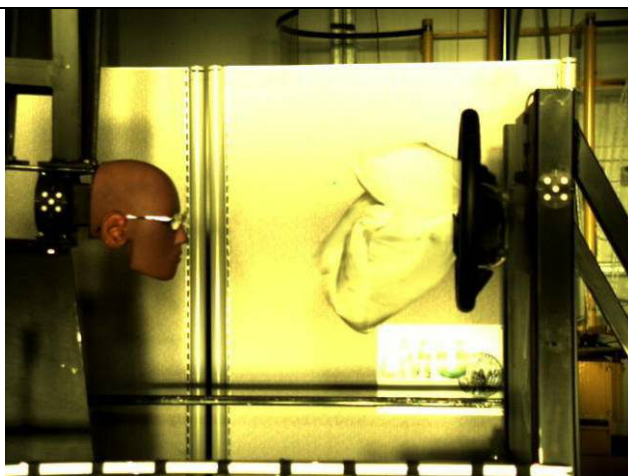




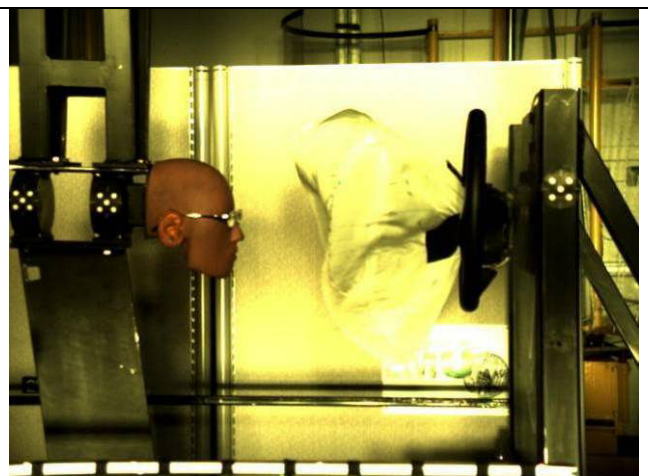
$t_0$  Auslösung Triggersignal



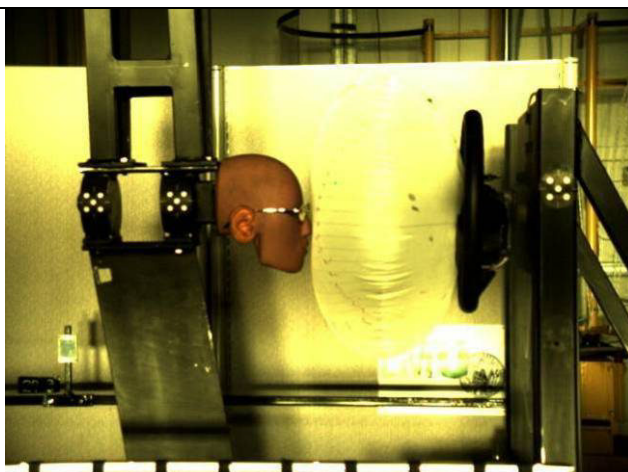
5 ms: Beginn Entfaltungsvorgang



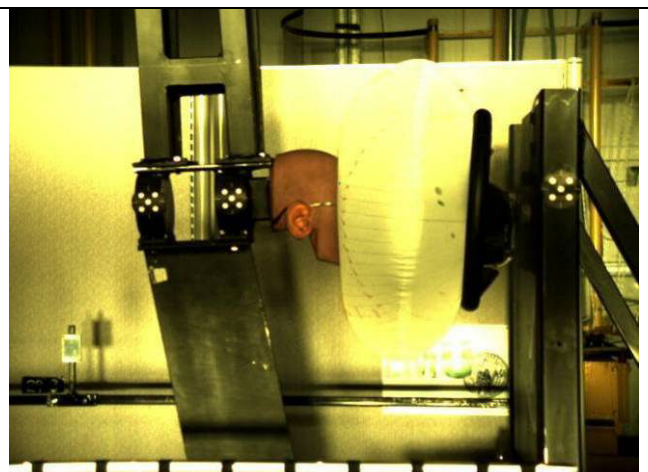
15 ms



25 ms



35 ms: Airbag komplett entfaltet



45 ms

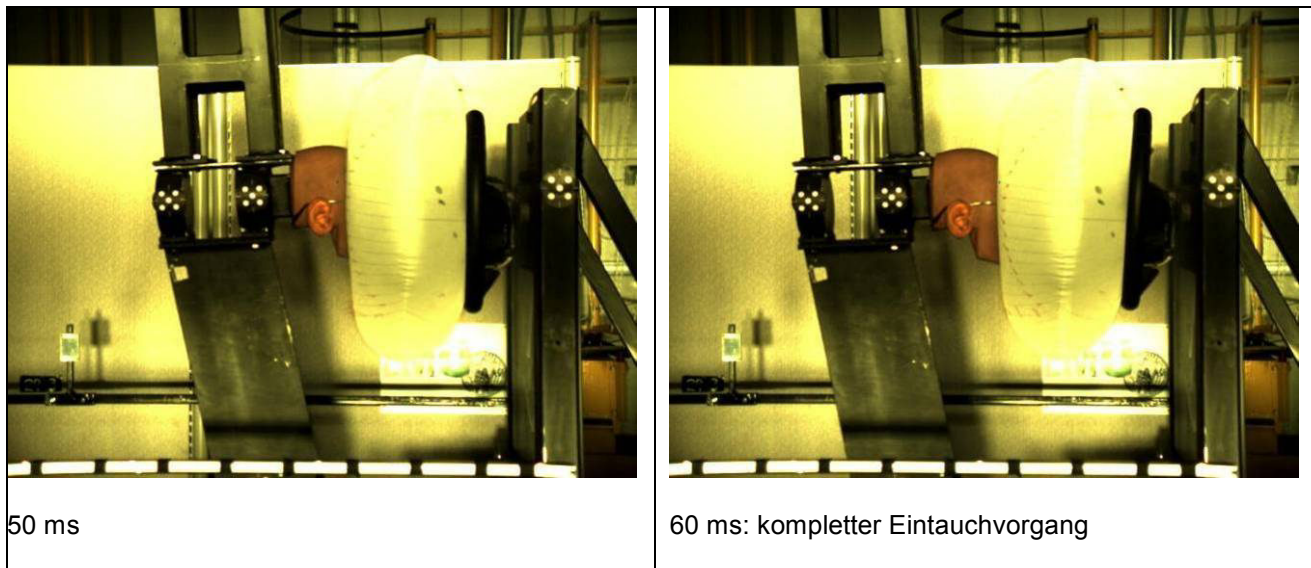


Abbildung 78: Zeitlicher Ablauf Entfaltungs- und Eindringvorgang Fahrerairbag

In allen Versuchen hat der Airbag ordnungsgemäß ausgelöst und es konnte kein Durchschlag des Dummykopfes auf das Lenkrad festgestellt werden. Ebenso wenig trat eine frühzeitige Aktivierung des progressiven Dämpfers auf, was zu einer Verfälschung der Verzögerungskurve geführt hätte. Tabelle 15 zeigt die in den Validierungsversuchen erreichten Maximalbeschleunigungen und Geschwindigkeiten des verwendeten Pendels.

Versuchsnr.	Volumen Airbag [l]	Fallhöhe Pendel [m]	CFS-Filterung	erreichte Geschwindigkeit [km/h]	maximale Beschleunigung [g]
1	45	3,52	1000	29,95	38,21
2	45	3,52	1000	29,93	38,20
3	45	3,52	1000	29,93	38,20
4	45	3,52	1000	29,95	38,21
5	45	3,52	1000	29,94	38,19
6	45	3,52	1000	29,96	38,22
7	45	3,52	1000	29,93	38,20

Tabelle 15 Ergebnisse Validierungsversuche

Die Geschwindigkeit des Pendels erhält man durch eine Integration der Beschleunigungskurve im Zeitbereich zwischen der Startposition und dem Durchlaufen des Nullpunkts bei ~ 250 ms.

$$v_{\text{Pendel}} = \int_{250\text{ms}}^{0\text{ms}} a dt$$

Die in den Versuchen erreichten Geschwindigkeiten liegen bei durchschnittlich 29,95 km/h. Vergleicht man die errechneten Geschwindigkeiten mit den tatsächlich erreichten Geschwindigkeiten aus den Versuchen, zeigt sich eine geringfügige Abweichung von kleiner 0,1 km/h.

Der Verlauf und die Maximalwerte der Beschleunigung, die durch das Pendel generiert wurden, sind bei allen Versuchen identisch (Abweichung < 0,05 g). Abbildung 79 zeigt den in der experimentellen Versuchsmethode typischen dreiecksförmigen Kurvenverlauf beim Eintauchvorgang in den entfalteten Airbag. Der Kopf des Dummys wird nach dem ersten Kontakt stetig abgebremst. Bei fortlaufendem Eintauchvorgang wird die Luft im Airbag immer stärker komprimiert und es kommt zu immer größeren Verzögerungswerten des Kopfes, bis der Maximalwert von ~ 38 g erreicht ist. Im Verlauf dieser Bewegung entweichen die komprimierten Gase durch die Austrittslöcher im Airbag. Dadurch wird ein stetiger Abbau der Bewegungsenergie erreicht.

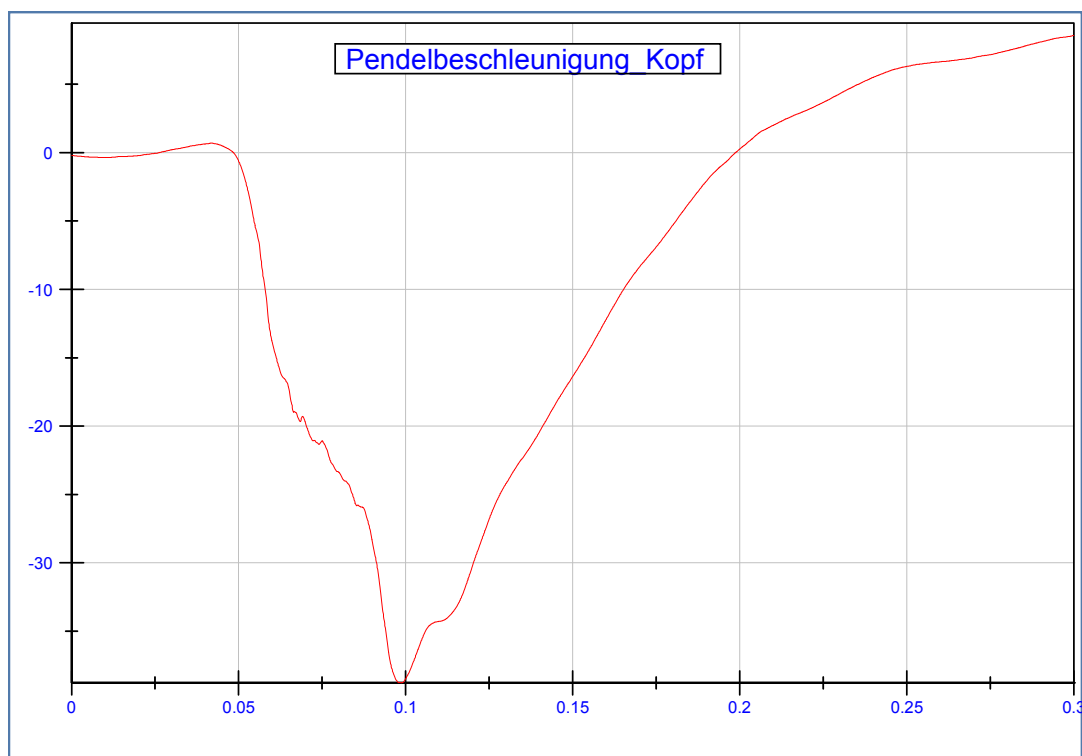


Abbildung 79: Validierungskurve Kopfbeschleunigung Pendel

Um eine Methodenvvalidierung der experimentellen Komponentenmethode durchzuführen, musste wie bereits erwähnt die Verzögerungskurve des Kopfes beim Eintauchvorgang in den Airbag in den erzeugten Beschleunigungskorridor eingefügt und verglichen werden. Liegen der Verlauf und die Höhe der Beschleunigung innerhalb dieses Korridors, ist das Pendel validiert. In Abbildung 80 ist die Verzögerungskurve

aus den Validierungsversuchen in den Beschleunigungskorridor aus Kapitel 4.3.3 übertragen worden. Es zeigte sich, dass der zeitliche Verlauf und der Maximalwert der Beschleunigung innerhalb des Korridors liegen. Die Verzögerung des Pendels tritt zeitlich etwas später ein. Dies kann aber vernachlässigt werden, weil diese Abweichung in der Verzögerung des Fahrzeugs beim Aufprallversuch begründet liegt. Bedingt durch die frühzeitige Aktivierung des Gurtsystems erfährt der Dummy eine zeitlich geringfügig frühere Verzögerung.

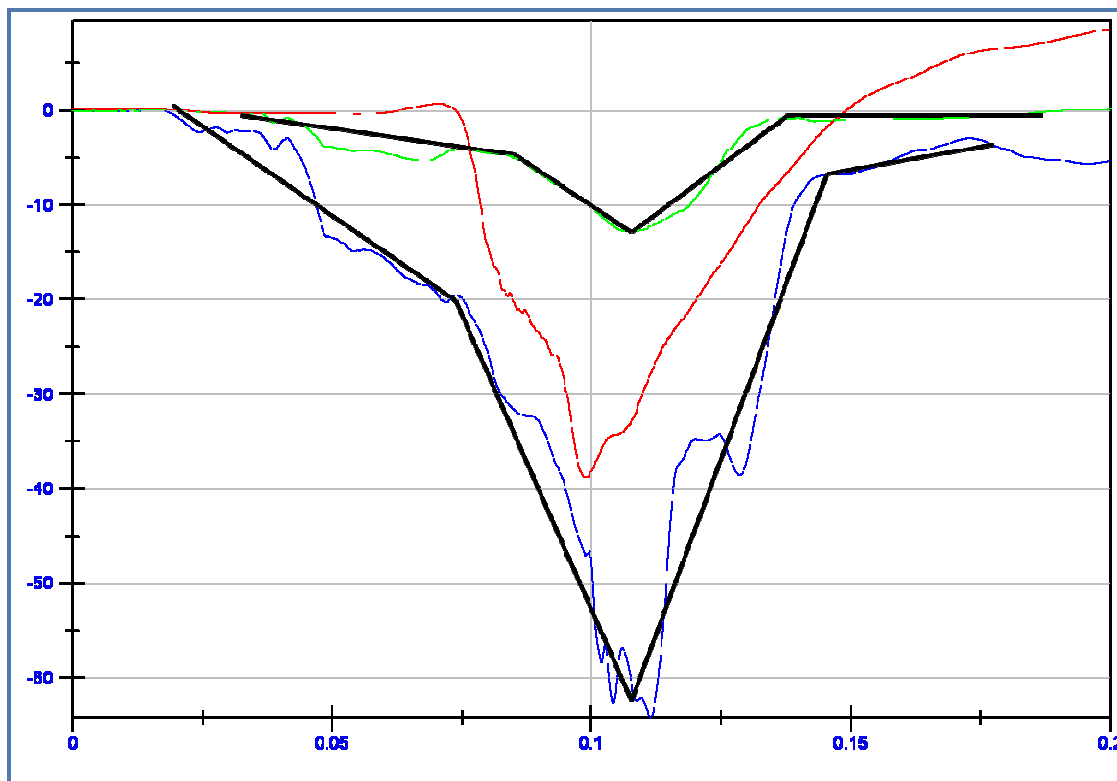


Abbildung 80: Validierung experimentelle Komponentenmethode

#### 4.5 Ergebnisse der Untersuchung der Bruchfestigkeit von Brillen- und Brillenmaterialien mittels experimenteller Komponentenmethode

Tabelle 16 stellt die Versuche mit der entwickelten Komponentenmethode dar. Die ersten sechs Versuche wurden mit randlosen Brillenmodellen durchgeführt. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben mussten fünf übereinstimmende Ergebnisse erreicht werden. Falls eine Brille einer Modellserie keinen Bruch bzw. einen Bruch im Vergleich zu den anderen erhalten hatte, musste dieses Modell erneut getestet werden. Die in Klammern dargestellte erste Zahl bezieht sich auf die Anzahl der Brüche bzw. Nichtbrüche und die zweite Zahl auf die Anzahl der nachgeprüften Modelle.

Versuch	Brillentyp	Brechungsindex	Airbagvolumen [l]	Anzahl Versuche	Bruch
1	randlos	1,5 / 1,5	45	6 (5/1)	Ja
2	randlos	1,5 / 1,5	45	5 (5/0)	Nein
3	randlos	1,5 / 1,5	45	6 (5/1)	Nein
4	randlos	1,5 / 1,5	45	5 (5/0)	Ja
5	randlos	1,5 / 1,5	45	7 (5/2)	Nein
6	randlos	1,5 / 1,5	45	5 (5/0)	Ja
7	Tragrand	1,5 / 1,5	45	3 (3/0)	Nein
8	Vollrand	1,5 / 1,5	45	3 (3/0)	Nein

Tabelle 16: Ergebnisse experimentelle Komponentenmethode

In den Versuchen zeigte sich, dass die hier getesteten randlosen Brillenmodelle eine höhere Bruchgefahr aufweisen als die getesteten Brillenmodelle mit Tragrand bzw. Vollrand. Die Brillenmodelle, die wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben einen Bruch erlitten haben, sind auch mit der entwickelten Airbag-Versuchsmethode zerstört worden. Die Brillen, welche die vorangegangenen Versuche ohne einen Bruch überstanden haben, erlitten auch hier keinen Bruch. Die Bohrlochdicke (Bohrlochdurchmesser) der gebrochenen Brillen lag zwischen 2,1 mm und 2,5 mm. Beim Brillenglasmaterial handelte es sich um Kunststoffmaterial (CR-39) bei einer konstanten Brechzahl beim rechten und linken Glas von 1,5.



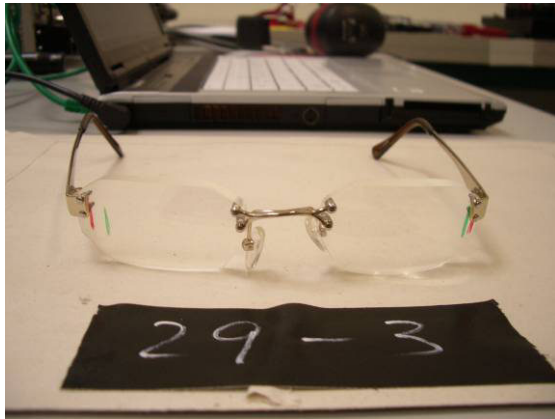


Abbildung 81: Versuch 3



Abbildung 82: Versuch 6

Die Geschwindigkeiten zum Aufprallzeitpunkt auf den Airbag betrugen im Mittel 29,94 km/h bei einer maximalen Verzögerung beim Eintauchvorgang in den Airbag im Mittel von 38,20 g. Der Verlauf und die Höhe der Beschleunigungen aller acht Versuchsserien entsprachen dem Verlauf aus Abbildung 79. Es konnte eine konstante Beschleunigungskurve erreicht werden, die der Validierungskurve entspricht. Die experimentelle Pendelmethode hat in allen Versuchen die gleiche Verzögerungskurve generiert.

#### *4.5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuche mit der experimentellen Komponentenmethode*

Die experimentelle Komponentenmethode lieferte über acht Versuchsserien mit insgesamt 40 Versuchen ein konstantes Ergebnis in den maximalen Verzögerungen des Dummykopfes (Schwankungsbereich Kopfverzögerung  $< 0,03$  g) sowie bei den erreichten Geschwindigkeiten (Schwankungsbereich der Pendelgeschwindigkeit  $< 0,03$  km/h). Die Testbedingungen in Anlehnung an EuroNCAP und RCAR konnten eingehalten werden. Des Weiteren hat sich herausgestellt, dass Brillenmodelle mit randloser Fassung in dieser Testserie eine höhere Bruchgefahr aufweisen als die getesteten Brillenmodelle mit Vollrand- und Tragrandfassung und einen Bruch meist an den Verschraubungen des Steges bzw. des Haltebügels erleiden. Die Bohrlochdicken liegen dabei zwischen 2,1 mm und 2,5 mm. Es handelt sich um CR-39-Material mit einem Brechungsindex von 1,5. Abbildung 83 zeigt ein zerstörtes und ein nicht zerstörtes randloses Brillenmodell vor und nach dem Versuch. Bei dem zerstörten Brillenmodell ist zu sehen, dass auch hier die Bruchstelle am Mittelsteg zu finden ist.

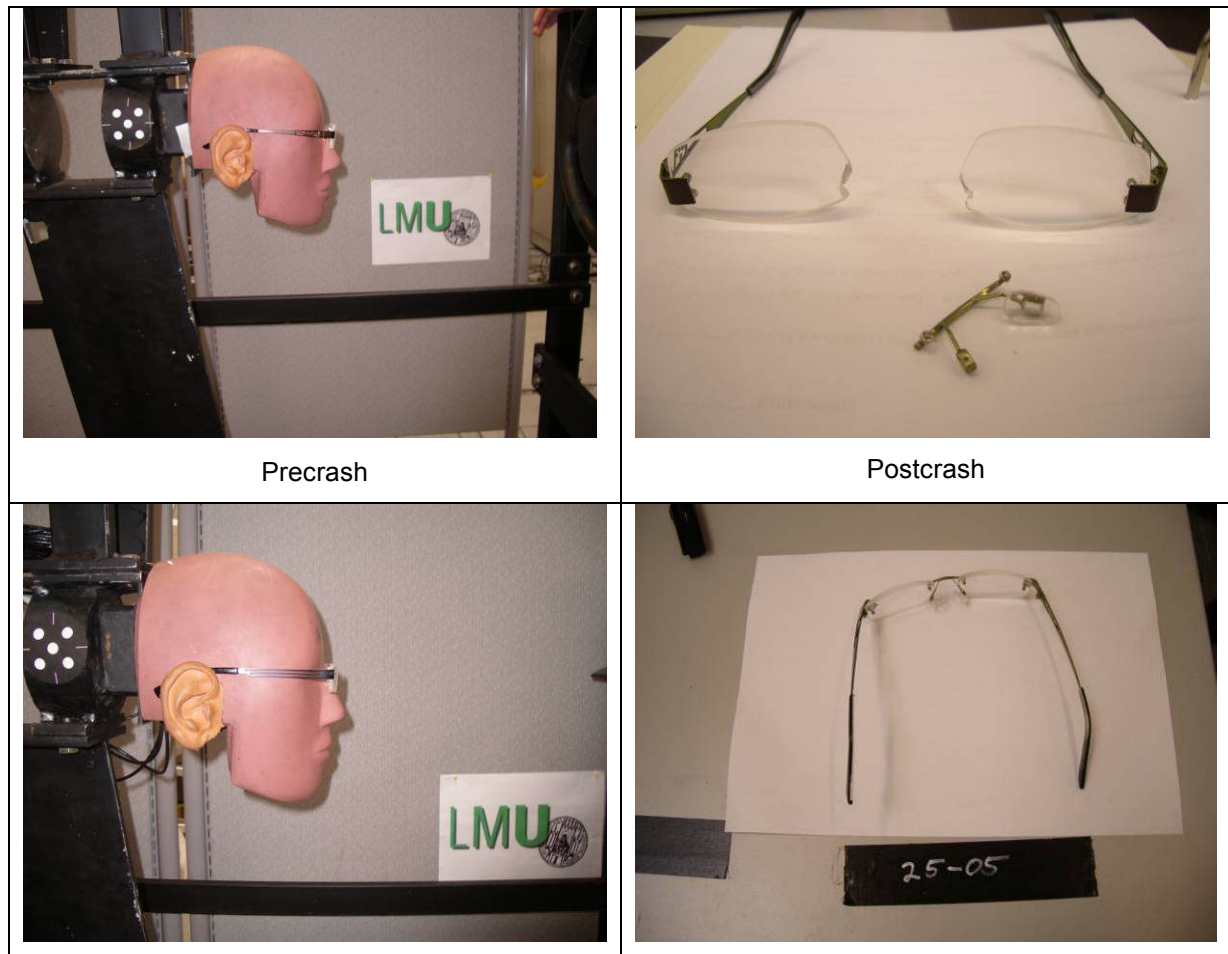


Abbildung 83: Pre- und Postcrash bei zerstörtem und intakt gebliebenem Brillenmodell

## 5 Diskussion

Grundsätzlich stellen Augenverletzungen durch eine Interaktion zwischen Airbag und Brillen eine Randerscheinung auf dem Gebiet der Ophthalmologie und in der Unfallforschung dar. Das zeigt sich unter anderem in der spärlich vorhandenen Literatur bezüglich dieser Thematik. Die Autoren um Gault et al. [4] waren unter den Ersten, die auf dieses Problem in den frühen 90er Jahren hingewiesen haben. Es wurden immer wieder Publikationen veröffentlicht, die Fallbeispiele dargestellt und das Problem erörtert haben. Telefonate mit verschiedenen Augenkliniken und medizinischen Universitätsinstituten ergaben, dass das Problem der Interaktion Airbag und Brille zwar häufig vorkommt, aber oft mit anderen Verletzungen korreliert ist, die vorrangig behandelt werden. Zur Inzidenz einer durch Brille-Airbag-Interaktion induzierten Augenverletzung konnte von den angesprochenen Augenkliniken keine Aussage getroffen werden.

Eine Augenverletzung, schlimmstenfalls eine Enukleation des Auges, stellt nach der Einteilung der Verletzungsschwere nach Körperregion maximal eine Stufe 3 (schwer) der 6-stufigen AIS-Klassifizierung dar. Aus medizinischer Sicht ist dies keine lebensbedrohliche Verletzung. Wenn z. B. AIS-4- (ernsthaft, 20 % Letalität) und AIS-5-Verletzungen (kritisch, 80 % Letalität) bei einem schweren Verkehrsunfall auftreten, werden diese natürlich vorrangig und eine mögliche Augenverletzung erst im zweiten Behandlungsabschnitt bei den dann Überlebenden behandelt.

Aus Sicht der Fahrzeugindustrie spielt eine Augenverletzung, bedingt durch einen Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung, keine Rolle. Die Fahrzeuge werden auf ihre passive Sicherheit, d. h. in diesem Fall auf das Zusammenspiel von Gurtsystem und Airbagmodul, so weit optimiert, dass sie die geforderten Grenzwerte, die vom Dummy gemessen werden, mit Sicherheitsabstand erfüllen. Der Kopf und der Thorax sind dabei die maßgeblichen Bereiche, die in die Bewertung zur Erfüllung der Schutzkriterien einfließen. Dabei bezieht sich der Schutz des Kopfbereiches auf die Vermeidung eines Schädelhirntraumas. Primär steht die Erhaltung der Vitalfunktionen im Vordergrund. Wenn allerdings eine bleibende Verletzung im Augenbereich mit einfachen Mitteln und geringem Aufwand vermeidbar ist, sollten Maßnahmen diesbezüglich unbedingt unternommen werden, zumal hier Langzeitfolgen zu einer deutlichen Reduzierung der Sehfähigkeit oder sogar zur Erblindung führen können.



Der maßgebliche Schutz des Augenbereichs beim Fahrzeuginsassen stellt eine verpflichtende Aufgabe der für Entwicklung und Konstruktion von Sehhilfen verantwortlichen Brillen- und Brillenglasindustrie dar.

Beobachtet man die Entwicklung der Prävalenz der Brillenträger (ab 18 Jahren), ist in den letzten Jahren ein Anstieg der Brillenträger zu verzeichnen [1] – immer mehr Menschen tragen Brillen.

Mit der entwickelten experimentellen Komponentenmethode können Brillen und ihre Materialien kostengünstig auf ihr Bruchverhalten beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung untersucht werden. Das vorrangige Ziel dabei ist, Augenverletzungen zu vermeiden.

Beginnend mit Versuchen zur Kinematik der Brille werden im Folgenden die Ergebnisse aus Kapitel 4 diskutiert.

### **5.1 Kinematik der Brille beim Pkw-Frontalaufprall**

Bei allen drei realen Frontalaufprallversuchen mit unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten ist das randlose Brillenmodell in seiner Anfangsposition auf dem Kopf des Dummys verblieben. Mit Tragrand- und Vollrandbrillenmodellen wurden keine Versuche durchgeführt. Dieses Ergebnis steht im Gegensatz zu einem Frontalaufprallversuch mit Brille, den Klanner et al. [3] durchgeführt haben. Bei ihrer Beobachtung handelte es sich um einen Crashtest, bei dem einem Frontalaufpralldummy eine Sonnenbrille aufgesetzt wurde, die sich durch den Aufprall vom Kopf des Dummys gelöst hat und im Innenraum des Fahrzeugs verblieben ist. Aus ihrer Untersuchung geht jedoch nicht hervor, ob die Brille durch die Entfaltung des Airbagmoduls oder durch das Bewegungsverhalten des Dummys vom Gesicht geschleudert wurde. Weiterhin ist nicht ersichtlich, aus welchem Material die Sonnenbrille bestand und ob es sich um eine Vollrand-, Tragrandbrille oder ein randloses Brillenmodell handelte. Die Untersuchung stammt aus dem Jahr 2000 und da die Popularität randloser Sonnenbrillenmodelle zu dieser Zeit eher gering war, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um ein Vollrand-Sonnenbrillenmodell gehandelt haben könnte [29]. Ein randloses Brillenmodell hat gegenüber einem Voll- und Tragrandbrillenmodell normalerweise eine geringere Masse und allein durch diese Tatsache hält sich ein leichtes Brillenmodell eher am Kopf des Dummys als ein schwereres. Inwieweit hier die Brille an den Dummykopf ohne Ohren angepasst wurde (Verbiegen der Bügel passend zur Kopfform) konnte auch nicht mehr geklärt werden.

Die Testsituation im Crashlabor mit Dummy kann natürlich nicht direkt auf die Realität übertragen werden. Die menschliche Haut hat ein anderes Reibungsverhalten als die Gummihaut des Hybrid-III-Dummys. Die Brille neigt durch die eher klebrige und stockende Oberfläche dazu, in ihrer Bewegung gehemmt zu werden. Bei den durchgeführten Versuchen zur Kinematik der Brille ist das Gesicht des Dummys deshalb mit Vaseline eingerieben worden, damit die Haftreibung zwischen der Dummyhaut und der Brille an den Kontaktstellen möglichst gering ist und die Realität bestmöglich nachgebildet wird. Trotz alledem ist die Brille während des Versuchs in der Anfangsposition auf dem Kopf verblieben.

Bei Klanner et al. konnte sich trotz der realitätsfremden Eigenschaften der Dummyhaut die Brille vom Gesicht lösen. Daher scheint die Oberflächeneigenschaft der Dummyhaut auf die Relativbewegung zwischen Brille und Kopf des Dummys keinen Einfluss zu haben und daher vernachlässigbar zu sein.

Die Aussage, die Klanner et al. getroffen haben, wonach die Brille bei einer Airbaginteraktion vom Kopf des Frontinsassen geschleudert wird, kann durch die hier durchgeführten realen Frontalaufprallversuche nicht mehr aufrechterhalten werden.

Weiterhin repräsentiert der in den Versuchen eingesetzte Hybrid-III-Dummy einen 1,78 m großen Mann mit einem Gewicht von 76,3 kg. Der Fahrersitz muss nach Euro NCAP- und RCAR-Versuchsvorschrift in die mittlere einstellbare Rasterposition eingestellt werden. Man kann davon ausgehen, dass nur ein geringer Anteil der Bevölkerung exakt diesen Maßen entspricht. Bei einer kleineren Körpergröße sitzt der Insasse normalerweise näher am Lenkrad und damit direkt in der Entfaltungsbahn des Airbags. Hier ist durchaus eine andere Kinematik der Brille vorstellbar. Es scheint jedoch unwahrscheinlich, dass sich allein durch die Kinematik des Insassen die Brille vom Kopf löst. Zudem ist das Zeitfenster geringer, bis der Kopf auf den Airbag trifft. Die Frage bleibt, ob die Möglichkeit besteht, dass der Airbag durch die Energie der Entfaltung die Brille vom Kopf des Insassen sozusagen „wegschießen“ kann.

Es kann davon ausgegangen werden, dass eine randlose Brille im Falle eines Frontalaufpralls mit Airbagauslösung am Kopf des Insassen verbleibt. Diese Aussage stützt sich auf die hier durchgeführten drei Frontalaufprallversuche und die vorhandenen Fallbeispiele in der Literatur [6, 7, 10, 11]. Ob dies für Tragrand- und Vollrandbrillen auch zutrifft, kann vermutet, wenn auch nicht zweifelsfrei bewiesen werden.

Um diese Frage exakt beantworten zu können, müssten weitere Frontalaufprallversuche mit diesen Brillenmodellen durchgeführt werden.

## **5.2 Bruchgefährdete Materialien**

Zur Ermittlung bruchgefährdeter Materialien wurden Vorversuche in Form eines Pendelversuchs durchgeführt [35]. Es wurde ein einfach zu realisierender Labor-Versuchsaufbau gesucht, um dem Problem der Interaktion zwischen Brille und Airbag näherzukommen und eine Vorselektion der Brillenmodelle zu erhalten.

Ein Pendelversuch wurde realisiert. Die Alternativen einer Kippvorrichtung oder einer hydraulischen Anlage, mit der der Dummykopf auf einen Airbag oder airbagähnliches Material geschossen wird, wurden aus Praktikabilitätsgründen und angesichts ökonomischer Zwänge verworfen.

Die bei der Pendelmethode auftretenden Kräfte und Beschleunigungen liegen zwar unter denen eines EuroNCAP-Pkw-Frontalaufpralls, für qualitative Aussagen, die mit den Vorversuchen getroffen werden sollten, ist dies jedoch ausreichend.

Als Kontaktmaterial für den am Pendel angebrachten Dummykopf wurde Schaumstoff gewählt, da z. B. Styropor, Hartgummi o. Ä. nicht die nachgebende Eigenschaft eines Airbags hätten simulieren können.

Der Auftreffwinkel des Dummy-Kopfes auf den Airbag konnte gut nachgestellt werden und entspricht dem im realen Aufprallversuch.

Analysiert man den Eindringvorgang in die Schaumstoffmatte, dreht sich der Dummykopf nach dem Erstkontakt nach hinten weg, was ursächlich in der flexiblen Aufhängung des Dummykopfes (Stahlseil) begründet ist. Dies sollte aber keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben, weil hierfür nur der Erstkontakt mit der Schaumstoffmatte von Interesse ist.

Die Methodik der Vorversuche kann als zweckdienlich gut und aussagekräftig eingestuft werden. Es konnte eine erste Differenzierung der Brillenmodelle und Linsen durchgeführt werden.

### ***5.2.1 Erste Versuchsserie (Differenzierung der Brillentypen)***

Es wurden 15 Fassungen getestet, jeweils fünf Vollrand-, fünf Tragrund- und fünf randlose Fassungen. Alle getesteten Tragrund- und Vollrandfassungen hielten dem Versuchsaufprall stand, alle randlosen Fassungen hingegen wiesen diverse Bruchstellen auf. Diese Ergebnisse lassen sich mit den Unterschieden der Vorspannungen

innerhalb des Brillenglases zwischen Vollrand-, Tragraund- und randlosen Fassungen darstellen und erklären (siehe Kap. 4.2.1).

Es zeigt sich, dass die Spannungen innerhalb einer Vollrandfassung auf das ganze Brillengestell gleichmäßig übertragen werden und keine punktuelle Belastung am Brillenglas auftritt. Einwirkende Kräfte werden bei einem Vollrandmodell gleichmäßig über den Rahmen auf die gesamte Fassung übertragen bzw. von der Fassung absorbiert. Die Absorption der Bewegungsenergie führt zu einer reversiblen Verformung der Brillenfassung (Abbildung 64).

Im Unterschied zu den Vollrand- und Tragraundfassungen sind bei randlosen Fassungen die Gläser nur an bestimmten Punkten am Brillengestell befestigt (Abbildung 63). Durch die Verbindung zwischen Fassung und Glas wirken bereits im Normalzustand höhere mechanische Spannungen und damit höhere punktuelle Kräfte auf das Glas als bei den Vollrandmodellen. Es zeigt sich eine sternförmige Ausbreitung der mechanischen Spannung an der jeweiligen Verbindungsstelle zum Gestell hin. Wirkt durch den Aufprall auf den Airbag eine zusätzliche Kraft von außen auf die Brillen, werden die Verbindungspunkte zwischen Glas und Fassung zusätzlich belastet. Bei der Tragraundfassung existiert eine Verbindung zwischen der rechten und der linken Seite und damit eine bessere Umverteilung der einwirkenden Kräfte auf das Gestell, ohne dabei das Glas zu belasten. Die Tragraundfassung bietet ebenso wie die Vollrandfassung eine Schutzfunktion für die Brillengläser durch eine Aufnahme und Umverteilung der eingeleiteten Kraft auf die gesamte Brillenfassung.

Die erste Versuchsreihe zeigt, dass Gläser in randlosen Brillenfassungen eine größere Bruchwahrscheinlichkeit aufweisen als Vollrand- und Tragraundfassungen. Die hier im Versuch getesteten randlosen Brillenmodelle haben alle einen Bruch an den Verschraubungen und zwischen den Verschraubungen am Glas erlitten.

### *5.2.2 Zweite Versuchserie (Differenzierung der Befestigung Gläser/Fassung)*

Das Ergebnis zeigt das Testmodell I (flexible Metallfassung, zwei Befestigungsstellen pro Glas, wobei eine geschraubt und die zweite über eine Kunststoffhülse fixiert ist) durch seine elastische Befestigung der Gläser weniger Brüche aufweist. Bei mechanischer Krafteinwirkung gibt einerseits die Fassung nach, die verhältnismäßig dünn gearbeitet ist, und andererseits die Kunststoffhülsen der Metallstifte, die aus ästhetischen Gründen sehr schlank gewählt und daher sehr weich und flexibel sind.

Sie geben bei geringer Belastung nach und dehnen sich. Somit wirkt die Kraft nicht mehr in voller Höhe direkt auf das Glas, sondern wird mittels der Hülsen gedämpft.

Für die Testmodelle II (Metallfassung mit Federscharnieren, vier Bohrungen pro Glas, jeweils zwei horizontal zum Rand des Glases verschraubt) und IV (steife Metallfassung, vier Bohrungen pro Glas, jeweils zwei horizontal zur Mitte des Glases verschraubt) ergibt sich ein ähnliches Bild: Auch bei diesen Fassungen kommt es zu vereinzelt Brüchen, obwohl beide Schraubverbindungen in Kombination mit einem zusätzlichen Metallstift verwendet werden. Diese starre Verbindung lässt keine Flexibilität zwischen Glas und Fassung mehr zu und alle Kräfte werden direkt auf das Glas übertragen. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Schraubverbindung oder der Stift sich am Rand oder in Richtung Mitte des Glases befindet.

Die Fassung des Testmodells II ist dünn gearbeitet, somit sind Deformationen der Fassung bei Krafteinwirkung relativ häufig zu finden. Zusätzlich verfügt dieses Modell über ein Federscharnier, das Kräfte in bestimmtem Maße aufnimmt und die Kraftwirkung auf das Glas bis zu einem gewissen Anteil minimiert.

Anders verhält sich Testmodell IV: Die Fassung besitzt kein Federscharnier und ist stabil gearbeitet. Deformationen der Fassungsteile sind aufgrund der Beschaffenheit so gut wie ausgeschlossen.

Dieser Unterschied ist deutlich an der Bruchhäufigkeit der beiden Modelle abzulesen. Beide Modelle verfügen über eine identische Befestigung, weisen jedoch unterschiedlich viele Brüche auf. Testmodell IV ist unflexibel, alle Kräfte wirken direkt und ohne Dämpfung durch die Fassung auf das Brillenglas, sodass Gläser in Kombination mit diesem Modell erheblich häufiger brechen.

Das Brillentestmodell III (starre unflexible Metallfassung, vier Bohrungen und vier Verschraubungen pro Glas) wies die meisten Glasbrüche auf. Die Verbindungspunkte der Fassung zum Glas sind zwei starre Schraubverbindungen – insgesamt vier pro Glas. Die Fassung ist sehr massiv gearbeitet und hat keine energieaufnehmenden Elemente. Die gesamte einwirkende Bewegungsenergie wirkt direkt auf das Glas, das bereits wegen der zwei Schraubverbindungen an einer Stelle enormen Spannungen unterliegt (Abbildung 87). Das Brillenmodell besitzt keinerlei Reserven, um die Energie in irgendeiner Form abzubauen. Dies zeigt sich im Ergebnis: Es kommt bei ca. doppelt so vielen Fassungen zu Glasbrüchen.

### 5.2.3 Dritte Versuchsserie (Differenzierung von Brillengläsern)

Die SEIKO Optical Europe GmbH [34], einer der führenden Brillenglashersteller in der Welt, wirbt mit Gläsern für randlose Fassungen, die im mittleren Brechungsindexbereich zu finden sind. Diese Gläser sollen im Gegensatz zu gering brechenden und sehr hoch brechenden Gläsern elastischer und biegsamer sein und somit stärkeren Kräften standhalten können.

Die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen stimmen mit den Aussagen des Brillenglasherstellers SEIKO überein. Bei geringbrechenden Gläsern und sehr hochbrechenden Gläsern kam es vermehrt zu einem Bruch (in 87,5 % bzw. 75 %). Bei den Gläsern mit einem mittleren Brechungsindex und beim Sicherheitsglas lag die Bruchwahrscheinlichkeiten unter 25 %.

Brillengläser mit einem Brechungsindex von 1,6 und 1,67 sind widerstandsfähiger als Gläser mit einem Brechungsindex von 1,5 und 1,74. Vergleicht man die Sprödigkeit bzw. die Bohrbarkeit eines Brillenglases mit den Brechungsindizes der Gläser (Abbildung 13), lässt sich ein Zusammenhang erkennen: Das Brillenglas mit dem niedrigsten Brechungsindex von 1,5 hat in den durchgeführten Versuchen die größte Bruchwahrscheinlichkeit aufgewiesen. Gleichzeitig hat dieses Glas die höchste prozentuale Sprödigkeit und ist nur äußerst schwer bohrbar.

Das Brillenglas mit einem hohen Brechungsindex von 1,74 hat eine Sprödigkeit von über 25 Prozent und liegt gerade noch innerhalb der Grenzen der guten Bohrbarkeit. Es ist das Brillenglas, das die zweitgrößte Häufigkeit aufwies, einen Bruch zu erleiden. Dies hat sich auch im Crashverhalten bestätigt.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden: Je spröder ein Material ist, umso größer gestaltet sich die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Brillenglas bei einer Interaktion mit dem Airbag einen Bruch erleidet. Anhand der Sprödigkeit eines Glases kann die Bruchwahrscheinlichkeit nahezu aller Glasarten genau bestimmt werden.

Aus den Vorversuchen kann geschlossen werden, dass eine randlose Brille mit vier Verschraubungen pro Brillenglas und geringen Brechungsindizes (1,5, 1,56) die bruchgefährdetste Brillenart ist und damit die tendenziell größte Verletzungsgefahr für einen Insassen beim Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung birgt.

Die Fassung nimmt auf das Bruchverhalten des Brillenglases einen großen Einfluss. Wünschenswert wäre es natürlich, alle möglichen Kombinationen aus Linsen/Fassung/Brechungsindizes etc. zu überprüfen, da sich theoretisch andere

Brucheigenschaften aus bestimmten Kombinationen untereinander ergeben könnten. Aus Praktikabilitätsgründen wurden im Rahmen dieser Arbeit nur die durchgeführten Versuche weiterverfolgt. Sie repräsentieren die am häufigsten vorkommenden Kombinationen von Materialien und Befestigungen an Brillen in der deutschen Bevölkerung [29].

### **5.3 Entwicklung und Validierung einer experimentellen Komponentenmethode**

Die Entwicklung einer Versuchsanlage für die Abbildung eines Pkw-Frontalaufpralls mit Airbagauslösung stellte den relevanten Hauptteil dieser Arbeit dar, um Brillen- und Linsenmaterialien, die Augenverletzungen verursachen, zu untersuchen und charakterisieren zu können. Zu diesem Zweck wurde die Kinematik, speziell die Kopfbewegung, eines Insassen beim Pkw-Frontalaufprall nachgebildet.

Die zu entwickelnde Komponentenmethode sollte folgende Kriterien erfüllen:

- Abbildung eines Pkw-Frontalaufpralls mit Airbagauslösung,
- Richtigkeit der Anlage (Validierung),
- Übertragbarkeit auf die Realität,
- Wiederholbarkeit der Versuche.

Grundsätzlich ist es für die Entwicklung einer Anlage irrelevant, wie der Dummykopf beschleunigt wird, um beim Eintauchvorgang des Kopfes in den Airbag die entsprechenden Verzögerungen zu generieren, die auch bei einem Pkw-Frontalaufprall auftreten. Es wurden wie bereits erwähnt andere Methoden überdacht, aber aus Praktikabilitäts- und finanziellen Gründen verworfen. Die Entscheidung fiel wie bereits bei den Vorversuchen auf den Aufbau eines großen physikalischen Pendels. Erfahrungen aus den Vorversuchen konnten so reflektiert und mit eingearbeitet werden. Wurde der Hybrid-III-Dummykopf in den Vorversuchen noch über zwei flexible Stahlseile aufgehängt, kam hier eine starre Aufhängung zur Anwendung. Damit wird der Dummykopf in seiner Eintauchbewegung in den Airbag nicht durch Rotations- oder Querschleunigungen beeinflusst.

Der beschleunigte Dummykopf muss im richtigen Winkel, entsprechend dem Eintauchwinkel im realen Pkw-Frontalaufprallversuch, auf das Airbagmodul auftreffen. Wegen der symmetrischen Eigenschaften des Fahrerairbags liegen überall gleiche

Druckverhältnisse nach dem Entfaltungsgang vor. Deshalb ist es egal, wie der Kopf in den Airbag eindringt. Er musste nur parallel und flächig auf den komplett entfalten Airbag auftreffen. Der durch die Lichtschranke gegebene Zündzeitpunkt musste an das Airbagmodul angepasst werden, damit der Kopf des Dummys und der vollständig entfaltete Airbag genau im Nulldurchgang des Pendels aufeinandertreffen.

Welches Airbagmodul auf der Fahrerseite eines Automobils verbaut wird, ist den Herstellern überlassen. Falls kein Airbag mit 45 Litern verwendet wird, müsste die Pendelanlage auf das jeweilige Airbagmodul neu eingestellt werden. Dazu bedarf es einer Probeauslösung des Airbagmoduls, um den Zündzeitpunkt neu zu bestimmen, und kleinerer Umbaumaßnahmen der Anlage. Zeitlich und finanziell stellt dies keinen großen Aufwand dar.

Für die Übertragbarkeit auf die Realität und die Richtigkeit der Anlage wurden die Verzögerungswerte des Kopfes, die durch die Airbagabbremmung vom Sensor des Dummykopfes aufgezeichnet wurden, sukzessive über eine Veränderung des Pendelgewichts und den Auslösezeitpunkt des Airbags angepasst.

Ein Anhaltspunkt war in diesem Zusammenhang der Teststandard des Body-Block-Versuchs (Kapitel 1.1) [12]. Beginnend mit 35 kg Pendelmasse wurden zwar über den Steinerschen Trägheitssatz [41] die Pendelmasse und die Pendelaufhängung mathematisch berechnet, aber aufgrund von Umbauten im Versuch bzw. an den starren Aufhängungen und den daraus resultierenden Gewichts- bzw. Trägheitsänderungen des Pendels das Gewicht der Pendelmasse versuchsweise reduziert, bis die Verzögerungskurve des Kopfes in den Airbag gute Ergebnisse lieferte.

Das Gesamtgewicht der Pendelanlage (Pendelaufhängung, Pendelgewicht, Dummykopf, Messtechnik) teilte sich zu einem Drittel in die Pendelaufhängung und zu zwei Dritteln in das Pendelgewicht auf. Dies entsprach einem Eintauchgewicht von 34 kg. Die genaue Gewichtsvorgabe von 35 kg konnte nicht erreicht werden. Bei Aufprallgeschwindigkeiten des Pendels von  $\sim 30$  km/h dürfte diese Ungenauigkeit jedoch keine große Rolle spielen und wurde in diesem Zusammenhang akzeptiert.

Wie Abbildung 86 verdeutlicht, liegt die durch das Pendel generierte Verzögerungskurve mittig im vorgegebenen Beschleunigungskorridor. Der Verlauf der Kurve ist ähnlich derjenigen der Pkw-Frontalaufprallversuche und die Amplitude liegt innerhalb des Korridors. Lediglich der Beginn der Kurve ist etwas später und der Anstieg der Kurve steiler als in den Realversuchen. Der Grund für die zeitliche Verzögerung und



den steilen Anstieg der Kurve liegt im nicht vorhandenen Rückhaltesystem. In der Realität entspricht der kurze Bereich des „sanften“ Verzögerungsanstiegs der Abbremsung durch den Gurt, der zwar hauptsächlich den Torso zurückhält, den Kopf aber schon auf eine Kreisbahn zwingt, womit ein Abbremsen in x-Richtung beobachtet werden kann. Diese Tatsache sollte in den weiteren Entwicklungsschritten des Pendels bedacht werden und in weitere Untersuchungen mit einfließen.

Betrachtet man den zeitlichen Ablauf eines Pkw-Frontalaufpralls (Abbildung 49), wird ersichtlich, dass der Kopf ab ca. 200 ms nach Erstkontakt eine Drehung im Airbag vollzieht, weil das Gurtsystem von links oben nach rechts unten befestigt ist. Zunächst wird die rechte Schulter zurückgehalten, während die linke Torsohälfte sich weiterbewegen kann. Dadurch kommt es auch beim Kopf zu einer Rotation um die z-Achse. Die Folge ist eine einseitige punktförmige Belastung der Brille, allerdings erst nach dem Erstkontakt. Möglicherweise kann die Brille trotzdem auch zu diesem Zeitpunkt eher dazu neigen, einen Bruch zu erleiden, wenn die Kraftverteilung seitens des Airbags nicht flächig, sondern punktuell auf die Brille erfolgt. Wie sich die Brille und ihre Materialien in diesem Fall verhalten, sollte in Zukunft untersucht werden. Eine Möglichkeit zur Realisierung wäre eine leicht schräge Befestigung des Dummykopfes auf dem Versuchspendel.

Der Versuch hält sich an die Versuchsvorschriften des EuroNCAP und der RCAR, aber weder der RCAR-Versuch mit 22 km/h noch der EuroNCAP-Versuch mit 64 km/h Aufprallgeschwindigkeit werden hier abgebildet. Um dies zu erreichen, müsste eine geringere bzw. höhere Pendelauslenkung gewählt bzw. eine höhere Pendelmasse verwendet und erneute Versuche zur Übertragbarkeit durchgeführt werden.

Da bei beiden realen Pkw-Frontalaufprallversuchen, insbesondere beim Test mit 22 km/h Aufprallgeschwindigkeit, aber die Brille einen Bruch erlitten hat, kann man davon ausgehen, dass es auch bei höheren Energien zum Bruch der Brille kommt, was der Versuch mit 64 km/h bestätigte. Aus diesem Grund ist es nicht zwingend notwendig, andere Aufprallgeschwindigkeiten zu generieren und zu untersuchen, auch weil hier ein breites Spektrum real auftretender Anprallgeschwindigkeiten beim Pkw-Frontalaufprall abgedeckt wird.

Alle Versuche, die auf dieser Anlage durchgeführt wurden, generierten die gleichen Verzögerungskurven. Damit ist gewährleistet, dass seitens der experimentellen Anlage immer gleiche Versuchsbedingungen für Brillentests vorliegen.

Alle gesetzten Kriterien sind erfüllt worden und die entwickelte experimentelle Versuchsmethode bildete den Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung ab.

Welches Brillenmodell tendenziell die größte Verletzungsgefahr im Augenbereich für einen Fahrzeuginsassen darstellt, sollten die Versuche mit der in dieser Arbeit entwickelten Komponentenmethode zeigen.

Wie sich bereits herausgestellt hat, bergen randlose Modelle unter den hier getesteten Brillenmodellen die höchste Bruchgefahr. Bei den acht durchgeführten Versuchsserien sind sechs randlose Brillenmodelle und jeweils nur eine mit Tragrand- und Vollrandmodell getestet worden. Es wurden die Brillenmodelle aus den Pendelversuchen aus Kapitel 5.2 herangezogen, um die Ergebnisse unter realen Aufprallbedingungen zu bestätigen.

Jedes randlose Brillenmodell wurde fünfmal getestet, die Tragrand- und Vollrandmodelle nur jeweils dreimal. Hat das jeweilige Brillenmodell bei jedem Versuch einen Bruch erlitten, wurde es als besonders bruchgefährdet eingestuft. Ist es von fünf Versuchen nur in drei Fällen gebrochen, wurden zwei Brillen nachgetestet. Eine willkürlich gesetzte Grenze von  $\geq 70$  Prozent sollte erreicht werden und in der ersten Serie mindestens die Hälfte einen Bruch erlitten haben, um die Brille als bruchgefährdet zu klassifizieren.

Dass nicht jede Brille gleichen Modelltyps bricht, liegt daran, dass gerade die randlosen Brillenmodelle einer gewissen Schwankungsbreite unterliegen. Die Einarbeitung bzw. die Verschraubungen der Gläser wurden vom jeweiligen Augenoptiker von Hand durchgeführt. Da u. a. kein Drehmomentschlüssel verwendet wurde, kann davon ausgegangen werden, dass jede Verschraubung unterschiedlich fest ist und demnach unterschiedliche Vorspannungen auf das jeweilige Brillenglas ausgeübt werden (Abbildung 89).

In den Versuchen mit der experimentellen Komponentenmethode hat sich gezeigt, dass die hier getesteten randlosen Brillenmodelle die tendenziell größte Gefahr darstellen, eine Verletzung im Augenbereich zu verursachen. Von den fünf überprüften Modellen sind genau die drei Modelle gebrochen, die auch in den Vorversuchen (mit Schaumstoffmatte) gebrochen sind. Die hier geprüften Tragrand- und Vollrandmodel-

le haben wie in den Vorversuchen erwartungsgemäß die Tests ohne Schäden überstanden.

Bei dem geprüften Linsenmaterial handelte es sich um das Kunststoffmaterial CR-39 mit konstanter Brechzahl von 1,5 und einer Bohrlochdicke von 2,1 mm und 2,5 mm.

Das Pendel lieferte wie in den Übertragbarkeitsversuchen konstante Geschwindigkeiten im Mittel von 29,94 km/h und eine Kopfverzögerung im Mittel von 38,2 g, die gemessenen Schwankungen waren kleiner als 0,03 km/h bzw. kleiner 0,03 g, was als geringe Schwankungsbreite gelten darf.

Diese Ergebnisse beziehen sich nur auf Brillenmodelle mit den hier beschriebenen Material- und Fertigungseigenschaften. Wie sich Brillenmodelle aus anderen Materialien, mit abweichendem Bohrlochdurchmesser, anderen Brechungsindizes etc. verhalten, kann derzeit nicht genau bestimmt werden. Zwar lässt sich eine grobe Aussage aus den Erfahrungen der innerhalb dieser Arbeit durchgeführten Versuche treffen, aber für genauere Erkenntnisse müssen deutlich mehr Brillenmodelle einschließlich der unterschiedlichen Konstellationen überprüft werden. Dies ergibt natürlich eine Versuchsmatrix mit viel höheren Stückzahlen, die dann aber primär die Brillen mit einbeziehen sollte, die in der Bevölkerung am häufigsten vorkommen. Dafür bedarf es allerdings genauer Auskünfte der Brillenhersteller und Vertriebe.

## 6 Ausblick

Eine führende Optikerkette in Deutschland hat Interesse an der Komponentenmethode bekundet und möchte ihre Brillen einer erweiterten Testmatrix mittels Labormethode unterziehen. Dies ermöglicht eine größere Fallzahl an zu untersuchenden Brillen und lässt weitere Erkenntnisse bzgl. Brillen und ihrer Materialien zu. Die Optikerkette kann im Falle eines Bruches Gegenmaßnahmen einleiten, damit ihre Brillenmodelle einen Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung besser überstehen und dem Insassen keine Verletzung im Augen- bzw. im Gesichtsbereich zufügen.

Weiteres zukünftiges Optimierungspotenzial besteht für die Airbagzulieferindustrie. Aktuelle Kosteneinsparungsmodelle beinhalten eine Verkleinerung des Volumens der Airbagsäcke. Da die Bewegungsenergie des Insassen über die Deformation des Luftsack abgebaut wird, müssen die Airbagmodule dadurch mit einem höheren Druck befüllt werden, was einen Anstieg der pro  $\text{cm}^2$  wirkenden Kraft zur Folge hat und so größere Kräfte auf die Brillen- und Brillenmaterialien einwirken. Hat man in den 90er Jahren versucht, den Airbagmodulen Aggressivität (geringerer Entfaltungsdruck) zu nehmen, experimentiert man heute an kleineren Modulen mit höherem Aufladedruck.

Weitere Fragen sollten in Zukunft geklärt werden:

- Wie verhalten sich Brillenmodelle, die bei einem Pkw-Frontalaufprall mit Airbagauslösung keinen Bruch erlitten haben bei einem erneuten Aufprall (Sekundäraufprall)? Hat die Brille- oder das Linsenmaterial Mikrorisse?
- Wie gestaltet sich das Bruchverhalten von Sonnenbrillen? Sind die Ergebnisse aus den Versuchen übertragbar?
- Welchen Einfluss hat der Beifahrerairbag auf die Brille?
- Welchen Einfluss hat der Kopf-Seitenairbag? Gerade dort erfährt die Brille laterale punktförmige Krafteinleitungen auf das Brillengestell.
- Das Verhalten von Airbags auf Freisprecheinrichtungen, Hörhilfen, Kopfhörer, Schmuck oder weitere Accessoires kann ebenfalls mittels der entwickelten Laborprüfmethode untersucht werden, auch hier könn-

te dann eine Aussage über entsprechendes Verletzungspotenzial und mögliche Optimierungen erfolgen.

## 7 Zusammenfassung

Durch die hohe Ausstattungsquote von Neufahrzeugen mit Airbags hat sich die Sicherheit für einen Insassen im Fahrzeug gegenüber der Vergangenheit nochmals deutlich erhöht. Mittlerweile ist jeder neue in Deutschland zugelassene Pkw mit mindestens zwei oder häufig sogar bis zu zehn Airbags ausgestattet. Der hohe verletzungspräventive Nutzen der Airbagauslösung ist unbestritten, wobei bislang Gesichts- und Augenverletzungen als leichte nicht letale Nebenwirkungen des Systems Insassensicherung betrachtet wurden. Airbaginduzierte Augenverletzungen durch Sehhilfen stellen eine Grauzone mit bislang sehr wenig publizierten Daten sowie einem bisher ungenutzten Optimierungspotenzial bezüglich des Brillengestells, der Brillengläser und der Airbagmodule dar.

In der spärlich vorhandenen Literatur wird zwar auf das Problem der Interaktion zwischen Airbag und Brille hingewiesen, klare Aussagen können aber weder über die Inzidenz der Verletzung noch über die Art der Brille, die eine Verletzung verursachen kann, getroffen werden.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden reale Frontalaufprallversuche mit Brillen durchgeführt, um zu prüfen, ob überhaupt ein Problem mit der Interaktion Brille-Airbag existiert. Nachdem klare Ergebnisse mit der Zerstörung von zwei Brillen bei zwei unterschiedlichen Aufprallversuchen vorlagen, wurde mit der Entwicklung einer experimentellen Komponentenmethode begonnen. Ein vollwertiger Frontalaufprallversuch kostet zwischen 50 000 und 100 000 Euro, die Kosten mit einer Komponentenmethode sind um ein Vielfaches geringer.

In der vorliegenden Arbeit wurde deshalb eine experimentelle Komponentenmethode entwickelt, die einen Pkw-Frontalaufprall unter standardisierten Versuchsbedingungen nach dem European New Car Assessment Programme (EuroNCAP) und dem Research Council for Automobile Repairs (RCAR) darstellt.

Mithilfe dieser Methode wurden einige Brillengestelltypen und Brillenmaterialien kategorisiert, sodass schließlich eine Aussage über Brillen mit der tendenziell höchsten Verletzungsgefahr für das menschliche Auge gemacht werden konnte. Die Vorteile dieser Methode liegen in den jederzeit reproduzierbaren Versuchsbedingungen und den vergleichsweise geringen Versuchskosten.

Es konnte gezeigt werden, dass die Brille bei unterschiedlichen Kollisionsgeschwindigkeiten am Kopf des Dummys – entgegen bisher vorherrschender Meinung – verharrt und keinerlei Eigenbewegung während des Aufpralls vollzieht.

Vorversuche mit verschiedenen Brillen- und Linsenmaterialien ergaben, dass gerade die hier getesteten randlosen Brillenmodelle ein erhöhtes Verletzungspotenzial für das menschliche Auge darstellen. Ursachen dafür sind im Aufbau der Brille allgemein und der Befestigung der Gläser im Besonderen zu suchen. Die Ergebnisse der Vorversuche wurden mittels der entwickelten Komponentenmethode dargestellt und überprüft.

Aus realen Pkw-Aufprallversuchen wurden die Kopfverzögerungen beim Eintauchvorgang in den Airbag bei 22 km/h und 64 km/h in ein Beschleunigungs-Zeit-Diagramm übertragen und ein Versuchskorridor generiert.

Es wurde ein physikalisches Pendel aufgebaut, das die Bewegung des Dummykopfes und den Eintauchvorgang in den entfalteten Airbag bei einem Pkw-Frontalaufprall simuliert.

Die Verzögerungskurve des Dummykopfes beim Eintauchvorgang in den Airbag brachte vergleichbare Ergebnisse und die daraus gewonnene Beschleunigungskurve passte gut in den generierten Beschleunigungskorridor aus den realen Pkw-Frontalaufprallversuchen. Damit ist die Übertragbarkeit aus den realen Pkw-Frontalaufprallversuchen auf die experimentelle Komponentenmethode gegeben.

Die in den Vorversuchen als bruchgefährdet klassifizierten Brillen- und Linsenmaterialien wurden mit der entwickelten Methode überprüft. Die Versuche wurden bestätigt und es hat sich gezeigt, dass die hier getesteten randlosen Brillenmodelle die größte Neigung mit sich bringen, einen Bruch zu erleiden, und damit das Verletzungsrisiko für die Augen eines Insassen beim Pkw-Frontalaufprall ansteigt.

Wie vorher schon erwähnt liegt die Bruchgefahr im strukturellen Aufbau der Brille begründet. Brillengläser, die starr an der Brillenfassung bzw. am Mittelsteg z. B. mittels zweier Verschraubungen befestigt sind, zeigen ein größeres Bruchpotenzial als Brillenmodelle, die nur eine Verschraubung bzw. flexible Befestigungsstellen haben. Weiterhin hat sich gezeigt, dass Brillenmodelle mit integrierten Deformationselementen wie z. B. Federn, flexiblen Scharnieren seltener einen Bruch erleiden als solche ohne.

Die hier entwickelte Methode soll der Brillen- und Airbagzulieferindustrie eine kostengünstige Möglichkeit bieten, ihre Produkte zu verbessern und weiterzuentwickeln und auf diese Weise die Sicherheit eines Insassen im Pkw weiter zu erhöhen und damit auch die nicht letale, aber durchaus zu ernsthaften Schädigungen mit Langzeitfolgen (Sehkraftverlust, Erblindung) führende Verletzungsgefahr weiter herabzusetzen.



## Literaturverzeichnis

- [1] Allensbacher Brillenstudie 2008, Ergebnisse der 21. Allensbacher Untersuchung zum Sehbewusstsein der Deutschen im Auftrag des Kuratoriums Guten Sehens (KGS), Berlin 2009.
- [2] Verunglückte, Getötete und Bestand motorisierter Fahrzeuge 2005, Bundesanstalt für Straßenwesen (Bast), Bergisch Gladbach 2009.
- [3] Klanner, W.; Ambos, R.; Paulus, H.; Hummelt, T.; Langwieder, K.; Köster, H.-J. W.: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), Heft F53. Wirtschaftsverlag NW Bremerhaven, 2004.
- [4] Gault, J. A.; Vichnin, M. C.; Jaeger, E. A.; Jeffers, J. B.; Ocular Injuries Associated with Eyeglass Wear and Airbag Inflation, in: Journal of Trauma, 38 (4): S. 494, Wills Eye Hospital, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 1995.
- [5] Duma, S. M.; Kress, T. A.; Porta, D. J.; Woods, C. D.; Snider, J. N.; Fuller, P. M.; Simmons, R. J.; Airbag-induced eye injuries – a report of 25 cases, in: Journal of Trauma, 41 (1): S. 114–119, Engineering Institute for Trauma and Injury Prevention, University of Tennessee, Knoxville, USA, 1996.
- [6] Schrader W.; Gramer E.; Goldman F.; Marcus U.; Penetrierende und perforierende Augenverletzungen bei Pkw-Unfällen von 343 Patienten vor und nach der Einführung des Bußgeldes für „Gurtmuffel“ (1966–1998), in: Klinisches Monatsblatt Augenheilkunde 217: S. 23–29, 2000.
- [7] Letho, K.; Sulander, P.; Tervo, T.; Do Motor Vehicle Airbags Increase Risk of Ocular Injuries in Adults? in: Journal of Ophthalmology 110 (6): S. 1082–1088, Helsinki University Eye Hospital, Finland, 2003.

- [8] ECE – R94, 2003-02-13 Aufprallschutz: Frontalaufprall, Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Kraftfahrzeuge hinsichtlich des Schutzes bei einem Frontalaufprall, 2003.
- [9] Tsuda, Y.; Wakiyama, H.; Amemiya, T.; Ocular injury caused by an air bag for a driver wearing eyeglasses, Department of Ophthalmology, in: Journal of Ophthalmology 43 (3): S. 239–240, Nagasaki University School of Medicine, Japan, 1999.
- [10] Lee, W. B.; O'Halloran, H. S.; Pearson, P. A.; Sen, H.A.; Reddy, S. H. K.; Airbags and bilateral eye injury: Five case reports and a review of the literature, in: Journal of Emergency Medicine 20 (2): S. 129–134, Department of Ophthalmology, University of Kentucky, Lexington, USA, 2001.
- [11] Rother, T.; Riechelmann, H.; Gronau, S.; Sekundär beschleunigte Fremdkörper als Gefahrenquelle bei Airbagauslösung, HNO 2006 54: S. 967–970, 2005.
- [12] ECE R12 Body Block, Protection of the driver against the steering mechanism in the event of impact, Geneva 1994, [www.Crash-network.com](http://www.Crash-network.com), 2009.
- [13] Grehn, F.; Leydecker, W.; Augenheilkunde, 29. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg 2008.
- [14] Kriegelstein, G.; Jonescu-Cuypers, C.; Severin, M.; Atlas der Augenheilkunde, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- [15] Lang, G.; Taschenbuch der Augenheilkunde, Thieme, Stuttgart, 2004.
- [16] Hansen, L.; Augenheilkunde systematisch, Klinische Lehrbuchreihe, UNI-MED, 2007.
- [17] Ardjomand, N.; Komerick, C.; McAlister, J. C.; Fasching, C.; El-Shabraw, Y.; Wedrich, C.; 100 Jahre erfolgreiche Hornhauttransplantation, in: Spektrum der Augenheilkunde, Ausgabe 21, S. 144–153, 2008.

- [18] Copes, W. S.; Sacco, W. J.; Champion, H. R.; Bain, L. W.; Progress in Characterising Anatomic Injury, in: Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the Association for the Advancement of Automotive Medicine, Baltimore, MA, USA 205-218, 2008.
- [19] Sato, Y.; Ohshima, T.; Kondo, T.; Air bag injuries – a literature review, in: consideration of demands in forensic autopsies, Forensic science international, Division of Environmental Medicine, 128 (3): S. 162–167, Forensic and Social Environmental Medicine, Graduate School of Medical Science, Kanazawa University, Takara-machi 13-1, Japan, 2002.
- [20] Penning, R.; Rechtsmedizin systematisch, Klinische Lehrbuchreihe, UNI-MED, Bremen, 2005.
- [21] Kramer, F.; Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen, Biomechanik – Simulation – Sicherheit im Entwicklungsprozess, Vieweg + Teubner, 2009.
- [22] Research Council for Automobile Repairs RCAR, [www.rcar.org](http://www.rcar.org), 2009.
- [23] Society of Automotive Engineers SAE Vorschriften, J211 Guideline, [www.sae.org](http://www.sae.org), 2009.
- [24] Greil, H.; Wie weit sind wir der DIN 33402 entwachsen? Universität Potsdam, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Biochemie und Biologie, Wissenschaftliche Einrichtungen. Zentrum für Umweltwissenschaften, 2001.
- [25] Rokosch, U.; Airbag und Gurtstraffer, Vogel Buchverlag, 1. Auflage, Würzburg, 2002.
- [26] Schlott, S.; Airbag – Die zündende Idee beim Insassenschutz, Bibliothek der Technik, Band 121. Landsberg am Lech, 1996.
- [27] Brooks, C. N.; Maxillofacial and ocular injuries in motor vehicle crashes;

- Annals of the Royal College of Surgeons of England, S. 149–155, Department of Emergency Medicine, Salford Royal Hospitals NHS Trust, Salford, UK, 2004.
- [28] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.; Physik für Ingenieure, Springer-Verlag; Auflage: 9. Auflage, 2004.
  - [29] Jahresbericht des Zentralverbandes deutscher Augenoptiker 2008.
  - [30] Cappon, H.; Mahieu, A.; Final Progress Report Whiplash 2, 2004.
  - [31] Euro NCAP; European new car assessment program, [www.euroncap.com](http://www.euroncap.com), 2009.
  - [32] RCAR, Research Council for Automobile Repairs, [www.rcar.org](http://www.rcar.org), 2009.
  - [33] SAE International, Guidelines for Filtering J211, 2009.
  - [34] Seiko optical GmbH, [www.seiko-optical.de](http://www.seiko-optical.de), 2009.
  - [35] ZVA, Zentralverband Deutscher Augenoptiker, Jahresstatistik Brillenglashersteller, 2009.
  - [36] [www.Fielmann.de](http://www.Fielmann.de), Brillenkollektion Herren.
  - [37] ADAC-Pressemitteilung Nr. 7, Im Jahr 2010 weniger Todesopfer denn je, 2011.
  - [38] Franz, M.; Diplomarbeit, Bruchverhalten von Brillen bei Airbagunfällen, Fachhochschule Jena, Studiengang Augenoptik, 2008.
  - [39] Bohl, H.; Technologie für Augenoptiker, Zentralverband für Augenoptiker, Doz-Verlag, Düsseldorf, 2003.

- [40] Martin, R.; Saller, K .; Kranimetrische Technik; in: Martin, R., Saller, K. (Hrsg.); Lehrbuch der Anthropologie, Band 1. Fischer-Verlag, Stuttgart, S. 429–500, 1957.
  
- [41] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.; Physik für Ingenieure, 6. Auflage, Springer-Verlag, S. 72, 1997.

## Glossar

ADAC	Allgemeiner Automobil-Club e. V.
AIS	Abbreviated Injury Scale, Skala der Verletzungsschwere nach Verkehrsunfällen
ATD	Anthropometric Test Device, Dummpuppe (Oberbegriff)
AZT	Allianz Zentrum für Technik, Ismaning bei München
BaSt	Bundesanstalt für Straßenwesen
Body Block ECE R12	Test zur Prüfung von Airbags gegen den Thorax
CFC	Channel Frequency Class, Filterbezeichnung
CR 39	Organisches Glas
Cornea Abrasion	Abkratzung der Hornhaut
deltaV ( $\Delta V$ )	kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung
DTC	Dynamic Test Center, Vauffelin, Schweiz
EuroNCAP	European New Car Assessment Programme, Bewertung von Neufahrzeugen hinsichtlich ihres Insassen- und Fußgängerschutzes
FMVSS	Federal Motor Vehicle Standards
g	Erdbeschleunigung ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

GDV	Gesamtverband Deutscher Versicherer
Hybrid III	Frontalaufpralldummy
Hyphaema	Blutansammlung vordere Augenkammer
ISS	Insassenschutzsysteme
Pelvic	Becken
Pkw	Personenkraftwagen
RCAR	Research Council for Automobil Repairs, Frontalaufprallversuche zur Schadensklasseneinteilung
SAE	Society of Automobile Engineers, nach der Gesellschaft benannte Art von Filterung zur Bearbeitung von Beschleunigungsdaten
Silikat	Material für Brillengläser
TÜV	Technischer Überwachungsverein
Thorax	Brust

